

**Vysoká škola báňská – Technická universita
Ostrava**

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

**Přechodné děje při provozu asynchronních
elektromotorů**

**Transient Effects by Asynchronous Motors
Operation**

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Stanislav Rusnok**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Přechodné děje při provozu asynchronních elektromotorů**
Transient Effects by Asynchronous Motors Operation

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor přechodných dějů asynchronního elektromotoru
2. Měření vybraných přechodných dějů asynchronního elektromotoru
3. Vyhodnocení měření
4. Porovnání naměřených hodnot s teoretickými předpoklady
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Bašta, J., Kulda, V., Pavlásek, F. a kol.: Měření na indukčních strojích, Praha, SNTL 1962
2. Chmelík, K.: Asynchronní a synchronní elektrické stroje, skripty VŠB-TU Ostrava, 2002
3. Michalec, J., Peřina, J.: Elektrické stroje I, skripty ČVUT Praha, 1989
4. Bašta, J.: Teorie elektrických strojů, SNTL Praha 1968
5. Petrov, G., N. : Elektrické stroje 2, SNTL Praha 1982

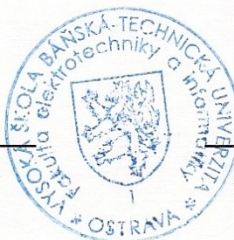
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

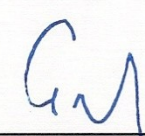
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“


.....

V Ostravě

4. května 2012

Poděkování:

Je mi velkým potěšením, že na tomto místě mohu upřímně poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. Děkuji mu za jeho ochotu vést mou diplomovou práci. Děkuji mu za jeho čas a pomoc, které mi věnoval při měření v laboratoři. V neposlední řadě bych mu chtěl poděkovat za cenné rady a připomínky, které mi při samotném zpracování práce výrazně pomohly.

Také bych velice rád na tomto místě poděkoval svým rodičům, kteří mi během celého studia i při psaní této práce poskytovali duševní a i ryze materiální podporu.

Když se nehodí fakta do vaší teorie, změňte fakta.
/Albert Einstein/

ABSTRAKT

Předkládaná práce obsahuje teoretický i praktický pohled na oblast přechodných dějů v asynchronních strojích. Zahrnuje teoretický rozbor i návrh způsobu řešení přechodných dějů. Významná část práce je věnována tvorbě simulačního modelu asynchronního stroje v programovém prostředí Matlab - Simulink, na kterém jsou následně provedeny simulace vybraných přechodných dějů. Práce je dále doplněna měřeními vybraných přechodných dějů na asynchronním stroji, které slouží nejen pro samotné posouzení těchto dějů, ale rovněž i jako verifikace vytvořeného simulačního modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

přechodné děje, Matlab - Simulink, d-q transformace, simulace, model asynchronního stroje

ABSTRACT

The present thesis includes theoretical and practical opinion on transients in induction machines. It contains a theoretical analysis and proposal method of solving transients. A significant part of thesis is devoted to creating a simulation model of induction machines in Matlab - Simulink in which simulations are then performed selected transients. The thesis is further supplemented by measurements of selected transients for induction machines, which are used not only for the assessment of these processes, but also created simulation model verification.

KEY WORDS

transients, Matlab - Simulink, d-q transformation, simulation, induction machine model

SEZNAM NĚKTERÝCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

<i>symbol</i>	<i>název</i>	<i>jednotka</i>
$\cos\varphi_0$	Účinit naprázdno	(-)
$\cos\varphi_K$	Účinit nakrátko	(-)
f	frekvence	(Hz)
I_N	Elektrický proud jmenovitý	(I)
I_0	Elektrický proud naprázdno	(I)
I_K	Elektrický proud nakrátko (záběrný)	(I)
I_{VYP}	Proudový náraz při odpojení stroje	(I)
J	Moment setrvačnosti	(kg.m ²)
L	Vlastní indukčnost	(H)
m	Počet fází	(-)
M	Vzájemná indukčnost	(H)
M_0	Moment naprázdno (ke krytí ztrát stroje v chodu naprázdno)	(N.m)
M_{max}	Moment maximální (moment zvratu)	(N.m)
M_N	Moment jmenovitý	(N.m)
M_P	Maximální přechodný moment	(N.m)
M_Z	Moment záběrný	(N.m)
n	Otáčky jmenovité	(min ⁻¹)
n_S	Otáčky synchronní	(min ⁻¹)
P	Výkon motoru	(W)
P_{I0}	Příkon naprázdno	(W)
ΔP_{0N}	Příkon ke krytí ztrát stroje naprázdno	(W)
p	Počet pólů	(-)
R	Rezistance	(Ω)
R_S	Odpor fáze statorového vinutí	(Ω)
s	skluz	(-)
t_a	Doba rozběhu	(s)
t_b	Doba doběhu	(s)
T_e	Elektromagnetický moment	(N.m)
T_{e0}	Elektromagnetický moment naprázdno	(N.m)
T_{emax}	Elektromagnetický moment maximální (zvratu)	(N.m)
T_{eN}	Elektromagnetický moment jmenovitý	(N.m)
T_{eP}	Maximální přechodný elektromagnetický moment	(N.m)
T_{evyp}	Elektromagnetický momentový ráz při vypnutí stroje	(N.m)
U_0	Elektrické napětí naprázdno	(V)
ϑ	Úhel vzájemné polohy statoru a rotoru	(°)
ψ	Spřažený magnetický tok	(H)
ω	Úhlová rychlost	(s ⁻¹)

OBSAH

ÚVOD.....	10
1. PŘECHODNÉ DĚJE V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....	11
1.1 Rozdělení přechodných dějů.....	11
1.2 Připojení asynchronního motoru k síti	11
1.3 Odpojení asynchronního motoru od sítě.....	13
1.4 Přepínání počtu pólů vinutí.....	13
1.5 Změna zatížení motoru	13
2. ŘEŠENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH.....	14
2.1 Základní rovnice asynchronního stroje	15
2.2 Transformace rovnic	17
2.2.1 Transformace direct-quadrature-zero (d,q,0)	18
2.3 Implementace rovnic do prostředí MATLAB	22
3. MODELOVÁNÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI	25
3.1 Měření odporů statorového vinutí asynchronní stroje	25
3.2 Měření asynchronního stroje naprázdno a nakrátko	26
3.3 Náhradní schéma asynchronního stroje	29
3.4 Prvky náhradního schématu a jejich výpočet	30
3.5 Sestavení simulačního modelu v prostředí Matlab – Simulink.....	32
4. SIMULACE PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI	35
4.1 Připojení a odpojení asynchronního motoru od sítě bez zátěže.....	35
4.1.1 Provoz při jmenovitém napájecím napětí $U_N = 400V$	35
4.1.2 Provoz při sníženém napájecím napětí na 50% U_N	39
4.1.3 Provoz při zvýšeném napájecím napětí na 120% U_N	43
4.2 Připojení a odpojení asynchronního motoru od sítě s plným zatížením	46
4.2.1 Provoz při jmenovitém napájecím napětí $U_N = 400V$	46
4.2.2 Provoz při sníženém napájecím napětí na 75% U_N	50
4.2.3 Provoz při zvýšeném napájecím napětí na 120% U_N	54
4.3 Asynchronní motor v přerušovaném zatížení.....	57

4.4 Asynchronní motor v přetížení	59
4.5 Přechod asynchronního stroje z motorického do generátorického režimu.....	61
4.6 Přechod asynchronního stroje z motorického režimu do režimu brzdy	63
4.7 Asynchronní motor při nesymetrickém napájení	65
4.8 Vyhodnocení realizovaných simulací	67
4.8.1 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení elektromotoru naprázdno	67
4.8.2 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení zatíženého elektromotoru	69
4.8.3 Porovnání přechodných dějů při provozu naprázdno a v zatížení	71
4.8.4 Vyhodnocení ostatních přechodných dějů	72
4.8.5 Závěrečné konstatování	73
5. MĚŘENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI	74
5.1 Připojení a odpojení asynchronního motoru bez zátěže	75
5.1.1 Asynchronní motor napájený ze sítě při jmenovitém napětí $U_N = 400V$	75
5.1.2 Asynchronní motor napájený z transformátoru při jmenovitém napětí $U_N = 400V$	77
5.1.3 Asynchronní motor napájený z transformátoru při sníženém napětí na 50% U_N	78
5.1.4 Asynchronní motor napájený z transformátoru při zvýšeném napětí na 120% U_N	79
5.2 Připojení a odpojení asynchronního motoru s plným zatížením	80
5.3 Opětovné připojení asynchronního motoru k síti	81
5.3.1 Opětovné připojení stroje se zaniklým rozptylovým magnetickým polem	82
5.3.2 Opětovné připojení stroje s rozptylovým magnetickým polem.....	84
5.4 Asynchronní elektromotor v přerušovaném zatížení.....	85
5.5 Vyhodnocení realizovaných měření	87
5.5.1 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení elektromotoru naprázdno	87
5.5.2 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení zatíženého elektromotoru.....	89
5.5.3 Porovnání přechodných dějů při provozu naprázdno a v zatížení	90
5.5.4 Vyhodnocení ostatních přechodných dějů	90
5.5.5 Závěrečné konstatování	91
6. VYHODNOCENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI ...	92
ZÁVĚR	95
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	96

ÚVOD

Asynchronní stroje se průmyslově používají již více než 100 let. Asynchronní stroj v motorickém režimu – tedy asynchronní elektromotor – je dnes nejrozšířenějším elektrickým strojem vůbec. K jeho všeobecnému rozšíření přispěla především jeho jednoduchost, nenáročnost na údržbu, poměrně dobré provozní vlastnosti, malá pořizovací cena a pochopitelně všeobecně používaný rozvod elektrické energie střídavými trojfázovými sítěmi. Asynchronní elektromotory se uplatňují jako pohony pro ventilátory, čerpadla, pračky, kompresory, výtahy, jeřáby, pohony dopravníků apod.

Můžeme se setkat i s asynchronním strojem v generátorickém režimu – tedy asynchronním generátorem, a to například u malých vodních elektráren, kde je rovněž použit pro svou jednoduchost.

Každý asynchronní stroj je pochopitelně nutné pro uvedení do činnosti zapnout a posléze i vypnout od elektrické sítě. Právě takové připojení a odpojení stroje od elektrické sítě je příčinou vzniku přechodných dějů v asynchronním stroji i v síti. Přechodné děje nevznikají jen při zapínání a odpojování stroje od sítě, ale rovněž také při přepínání vinutí Y/D, přepínání počtu pólů vinutí, reverzací, změně zatížení, či zkratu na svorkách stroje nebo v síti. Znalost velikosti a průběhů těchto přechodných dějů je velice důležitá nejen z hlediska samotného návrhu stroje, ale rovněž i z hlediska volby optimálního způsobu je provozování.

Právě přechodnými ději při provozu asynchronních strojů se zabývá tato diplomová práce, která si ovšem neklade za cíl komplexní pojetí této problematiky. Je zaměřena na zkoumání vybraných přechodných dějů v asynchronním stroji s klecovým rotorem. Komplexní rozbor přechodných dějů v asynchronních strojích by přesahoval rámec diplomové práce.

Celou svou práci jsem koncipoval do šesti stěžejních kapitol. Náplní první kapitoly je stručný teoretický rozbor přechodných dějů, které se mohou vyskytnout u posuzovaného stroje. Následující kapitola se zabývá způsobem řešení těchto dějů. Třetí kapitola obsahuje měření a výpočet důležitých parametrů pro tvorbu simulačního modelu, který je v následující čtvrté kapitole použit pro simulaci přechodných dějů. V páté kapitole jsou realizována měření vybraných přechodných dějů na asynchronním stroji a konečně šestá kapitola je vyhodnocením všech poznatků získaných v předešlých statích této práce.

1. PŘECHODNÉ DĚJE V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH

Přechodný (neustálený) děj obecně nastává, přechází-li obvod z jednoho ustáleného stavu do jiného ustáleného stavu. Přechodným dějem je například zapínání a vypínání elektrického stroje, přičemž ustáleným provozním stavem pak v tomto případě rozumíme zapnutý, či vypnutý elektrický stroj.

1.1 Rozdělení přechodných dějů

Z hlediska doby trvání přechodných dějů v asynchronních strojích můžeme provést rozdělení do následujících dvou kategorií:

- **Elektromagnetické přechodné děje**, jejichž doba trvání je řádově v desetinách sekundy.
- **Elektromechanické přechodné děje**, jejichž doba trvání se mění v širokých mezích, řádově od desetin sekundy až po desítky sekund.

Přechodné děje v asynchronních strojích vznikají při každé změně jejich provozních podmínek. Tedy při všech rychlých změnách zatížení a rovněž při připojení stroje k síti či při jeho odpojení, při přepínání vinutí Y/D, přepínání počtu pólů vinutí, reverzaci a zkratech na svorkách stroje nebo v síti. Z provozního hlediska jsou nejvýznamnější přechodné děje vznikající při připojování stroje k síti a odpojování stroje od sítě. Vzhledem k typu asynchronního elektromotoru, který je v rámci této práce použit pro zkoumání přechodných dějů, přicházejí de facto v úvahu následující přechodné děje.

1.2 Připojení asynchronního motoru k síti

V okamžiku připnutí se klecový motor chová podobně jako transformátor nakrátko při připnutí na síť. V tomto okamžiku protéká motorem záběrný (zkratový) proud omezený při daném napětí výhradně impedancí motoru nakrátko. Rozběh motoru je provázen proudovými a momentovými rázy. Přechodné jevy jsou značně tlumené a na dobu jejich trvání má značný vliv moment setrvačnosti stroje J . Typický průběh momentu M a otáček n při spuštění stroje je na obr. 1.1.

Podle vztahu (1.1) je možné určit krajní velikost přechodového momentu, který může zakmitnout při připojení stroje na síť [3]:

$$M_p = M_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \varphi_k} \right) \quad (1.1)$$

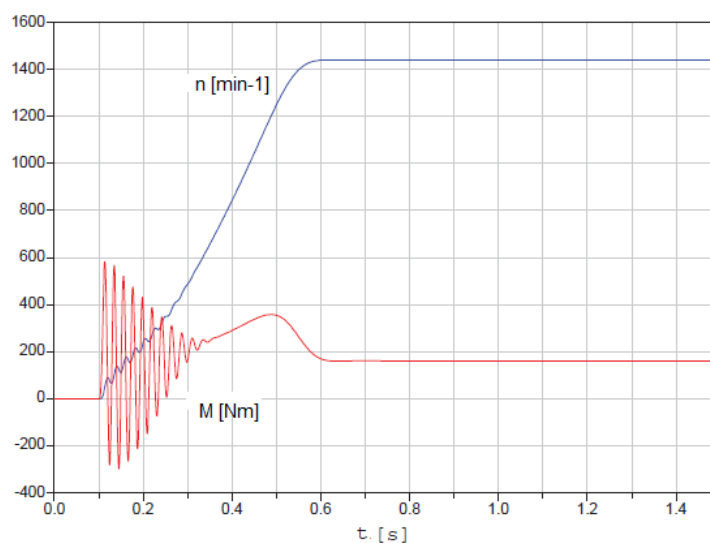
Při přímém připojování stroje na síť záleží, zda se jedná o tzv. tvrdý či tzv. měkký zdroj. Při napájení z měkkého zdroje (například z transformátoru) dochází v okamžiku zapnutí stroje k úbytku napětí na svorkách zdroje, což je provázáno nejen poklesem momentu, ale rovněž i většími základy na průběhu proudu a momentu a rovněž i delší dobou trvání přechodných dějů.

Celková doba rozběhu motoru, pomocí které je možné posuzovat chování stroje při elektromechanických přechodných jevech, je definována jako tzv. normální doba rozběhu. Je to doba, za kterou by se uvažovaný stroj rozběhl z nulové rychlosti na svou jmenovitou rychlost, kdyby byl rozbíhán svým jmenovitým momentem a zatěžovací moment by byl nulový. Podle [16] platí:

$$t_a = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{M_N} \quad (1.2)$$

Při známé hodnotě doby rozběhu je možné určit velikost celkové energie přeměněné na teplo během rozběhu (vliv velkých záběrných proudů) [2]:

$$W_j = \int_0^{t_a} (m \cdot R_s \cdot i_s^2 + m \cdot R'_r \cdot i_r'^2) dt \quad (1.3)$$



Obr. 1.1 Průběh otáček a momentu asynchronního motoru při přímém spuštění

1.3 Odpojení asynchronního motoru od sítě

Přechodný děj, vznikající při odpojení asynchronního motoru od sítě, je vyvolán postupným úbytkem magnetické energie motoru. Magnetický tok se při odpojení zmenšuje postupně, neboť jeho změně brání proudy vznikající při tomto ději v rotoru. Rychlost tohoto zmenšování magnetického toku je dána časovými konstantami rotorových obvodů. Proudů vinutí rotoru se po odpojení elektromotoru postupně aperiodicky zmenšují.

1.4 Přepínání počtu pólů vinutí

Námi v následujících kapitolách posuzovaný elektromotor je dvouotáčkový. Během provozu je tedy možné přepínat elektromotor z nižších otáček na vyšší a opačně, což je spojeno rovněž se vznikem přechodného děje. Z hlediska přechodných dějů nesmí při přepínání vinutí vznikat větší asynchronní a synchronní momenty ani vibrační síly vyvolané vyššími harmonickými magnetického pole.

1.5 Změna zatížení motoru

V provozu elektrických pohonů asynchronními elektromotory se vyskytují různé druhy a charakteristiky zátěžných momentů, které jsou spjaty s druhem pracovního mechanismu. Zátěžné momenty se v podstatě mohou měnit buďto v závislosti na čase, nebo na některé mechanické veličině. V převážné většině aplikací jde o časové změny zátěžných momentů. Pakliže bude elektromotor zatěžován konstantním zátěžným momentem M_1 a v daném čase dojde skokově ke zvětšení zátěžného momentu na hodnotu M_2 , dojde k přechodnému ději.

2. ŘEŠENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH

Vývoj programového prostředí sebou přinesl odborné veřejnosti zabývající se zkoumáním vlastností elektrických strojů významný nástroj. Pro řešení přechodných dějů v elektrických strojích je proto dnes běžné užít libovolný simulační program, nebo programovací jazyk.

Veškeré simulační programy, v kterých je možné zkoumat provozní stavy elektrických strojů, je možné z uživatelského hlediska v podstatě rozdělit do dvou kategorií. V prvním případě uživatel vytváří přímo elektrický obvod složený ze základních elektrotechnických prvků či již vytvořených bloků. V druhém případě pak při modelování postupuje ryze matematickým způsobem a na daný elektrický stroj pohlíží výhradně jako na soustavu numerických rovnic.

Když jsem byl postaven před rozhodnutí výběru vhodného simulačního programu pro řešení přechodných dějů v asynchronním stroji, měl jsem možnost se seznámit s následujícím software, ve kterém různí zahraniční i domácí autoři řešili provozní stavy a vlastnosti elektrických strojů:

- Program DYNAST (freeware program)
- Program OpenModelica (freeware program vyvíjený švédskou Linköpings universitou)
- ATP – EMTP
- Program LabVIEW
- klasické programovací jazyky (kupříkladu Borland C++)

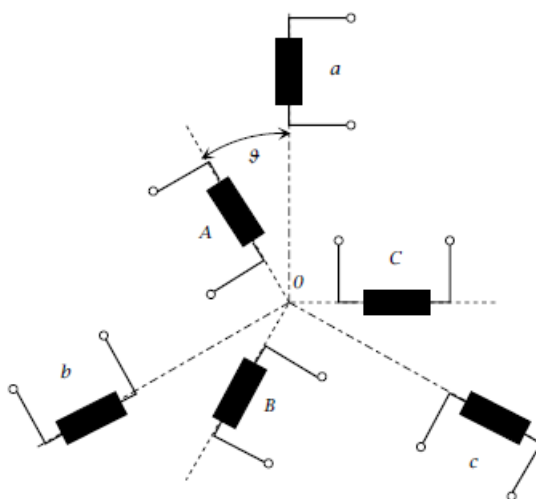
Zahraniční i domácí odborná veřejnost však nejčastěji k řešení jakýchkoliv otázek z oblasti elektrických strojů užívá programového prostředí **MATLAB – Simulink**, které představuje velice mocný a universální nástroj pro řešení všech problémů z technické oblasti.

V programu Matlab – Simulink je možné modelovat elektrických stroj (elektrický pohon) buďto pomocí matematických bloků (bloky představují základní matematické operace), nebo pomocí elektrotechnických bloků (elektrotechnické obvodové prvky a modely).

V následujících podkapitolách jsem naznačil postup modelování elektrického stroje v prostředí Matlab – Simulink pomocí matematických bloků, které vychází z obecné teorie elektrického stroje a následné transformace do dvouosového ortogonálního systému.

2.1 Základní rovnice asynchronního stroje

Obecná teorie elektrického stroje je popsána podrobně v [6] [9] [13]. Budeme uvažovat asynchronní stroj se souměrným vinutím statoru i rotoru s konstantní vzduchovou mezerou (Obr. 2.1). Takový stroj má celkem 6 vinutí, a to trojfázová statorová vinutí (a, b, c) a trojfázová rotorová vinutí (A, B, C).



2.1 Schematické uspořádání asynchronního stroje

Pro tato vinutí je možné napsat těchto 6 napět'ových rovnic:

$$\begin{aligned}
 u_a &= R_a \cdot i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\
 u_b &= R_b \cdot i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\
 u_c &= R_c \cdot i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\
 u_A &= R_A \cdot i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\
 u_B &= R_B \cdot i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\
 u_C &= R_C \cdot i_C + \frac{d\psi_C}{dt}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Dále je nutné definovat rovnice spřažených magnetických toků. Ty lze rozepsat pomocí vlastních a vzájemných indukčností následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}
\psi_a &= L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C \\
\psi_b &= L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C \\
\psi_c &= L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C \\
\psi_A &= L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c + L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C \\
\psi_B &= L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c + L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C \\
\psi_C &= L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c + L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Při odvozování matematického modelu asynchronního stroje je nutné přijmout určitá zjednodušení. Jak již bylo v úvodu kapitoly 2.1 poznamenáno, jedním z významných předpokladů je, že trojfázová vinutí statoru a rotoru jsou souměrná a dále, že stroj má hladký stator a rotor a vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je rovnoměrná (klecové provedení). Za těchto předpokladů si můžeme dovolit úvahu, že pro parametry jednotlivých fázových vinutí platí:

$$\begin{aligned}
R_a &= R_b = R_c = R_s & R_A &= R_B = R_C = R_r \\
L_{aa} &= L_{bb} = L_{cc} = L_s & L_{AA} &= L_{BB} = L_{CC} = L_r \\
L_{ab} &= L_{ac} = L_{bc} = -M_s & L_{AB} &= L_{AC} = L_{BC} = -M_r
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Vzájemné indukčnosti statorových a rotorových vinutí závisí na vzájemné poloze statorového a rotorového vinutí (vyjádřeno úhlem ϑ). Vzájemné indukčnosti vinutí stejných fází statoru a rotoru jsou největší při úhlu $\vartheta = 0$, při kterém vinutí leží prostorově v jedné ose (překrývají se). V takovém případě platí:

$$L_{aA} = L_{Aa} = L_{bB} = L_{Bb} = L_{cC} = L_{Cc} = M \cdot \cos \vartheta \tag{2.4}$$

Vzájemné indukčnosti vinutí různých fází statoru a rotoru jsou pak největší v případě, kdy je rotor natočen o úhel $\pm 2\pi/3$. V takovém případě platí:

$$\begin{aligned}
L_{aB} &= L_{Ba} = L_{bC} = L_{Cb} = L_{cA} = L_{Ac} = M \cdot \cos \left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\
L_{Ab} &= L_{bA} = L_{Bc} = L_{cB} = L_{Ca} = L_{aC} = M \cdot \cos \left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Nyní do soustavy rovnic spřažených magnetických toků (2.2) dosadíme za jednotlivé indukčnosti výrazy z rovnic (2.3) až (2.5). Tím obdržíme soustavu rovnic, kterou je vhodné z důvodu přehlednosti uvést v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -M_s & -M_s & M \cdot \cos \vartheta & M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ -M_s & L_s & -M_s & M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos \vartheta & M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ -M_s & -M_s & L_s & M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos \vartheta \\ M \cdot \cos \vartheta & M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & L_r & -M_r & -M_r \\ M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos \vartheta & M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & -M_r & L_r & -M_r \\ M \cdot \cos\left(\vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos\left(\vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) & M \cdot \cos \vartheta & -M_r & -M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Zjednodušeně můžeme psát:

$$\|\psi\| = \|L\| \cdot \|i\| \quad (2.7)$$

Některé koeficienty této indukčnostní matice $\|L\|$ jsou v závislosti na čase funkce periodické. Tyto periodické koeficienty (tedy všechny koeficienty závislé na ϑ) je možné eliminovat vhodnou transformací proměnných, jak je o tom pojednáno dále.

2.2 Transformace rovnic

K transformaci statorových napětí, proudů a magnetických toků se používá transformace do dvou vzájemně kolmých (ortogonálních) os otáčejících se vhodně zvolenou rychlostí ω_k . V odborné literatuře [7] [15] [17] se nejčastěji používá Parkovy nebo Clarkovy transformace. Podle zvoleného úhlu ϑ_k , kterému odpovídá úhlová rychlost ω_k , můžeme podle [11] provést následující rozdělení souřadných systémů:

- $\omega_k = 0$: Transformace do souřadnic pevně svázaných se statorem

(Clarkova transformace $\alpha, \beta, 0$)

- $\omega_k = \omega$: Transformace do souřadnic svázaných s rotorem
(Parkova transformace $k, l, 0$)
- $\omega_k = \omega_s$: Transformace do souřadnic rotujících synchronní rychlostí
(Transformace $d, q, 0$)

Volba systému, ve kterém budeme rovnice modelovat, může výrazně ovlivnit přesnost a kvalitu simulace. V [11] lze nalézt doporučení, že Clarkova transformace je vhodná pro sledování statorových veličin a rovněž je vhodné ji použít v situaci, kdy statorová napětí jsou nesymetrická, avšak rotorová napětí symetrická jsou (klecové stroje). Dále, že systém pevně svázaný s rotorem je vhodný pro sledování rotorových veličin a rovněž je vhodný v situaci, kdy rotorová napětí jsou nesymetrická, kdežto statorová napětí jsou symetrická.

A konečně, že systém rotující synchronní rychlostí je vhodný pro sledování regulačních dějů.

Autor [9] dále k výběru vhodného systému uvádí, že transformace $\omega_k = \omega_s$ je výhodná z důvodu, že všechny veličiny na statoru i na rotoru se zobrazí jako stejnosměrné. Uvádí, že je vhodné ji použít pro asynchronní stroje. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že zvolíme transformaci $\omega_k = \omega_s$ (transformace $d, q, 0$).

2.2.1 Transformace direct-quadrature-zero (d,q,0)

Nyní budeme pokračovat v odvození matematického modelu asynchronního stroje za použití transformace. Označíme nyní původní statorové veličiny x_a, x_b, x_c jako x_d, x_q, x_0 a napíšeme transformační matici:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_d \cdot \cos \mathcal{G}_k & k_d \cdot \cos(\mathcal{G}_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & k_d \cdot \cos(\mathcal{G}_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ -k_q \cdot \sin \mathcal{G}_k & -k_q \cdot \sin(\mathcal{G}_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & -k_q \cdot \sin(\mathcal{G}_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Řešení determinantu této matice je:

$$D = k_d \cdot k_q \cdot k_0 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \quad (2.9)$$

Z výsledku vyplývá podmínka, že žádný z koeficientů k_d , k_q , k_0 nesmí být nulový.

Zpětná transformace má pak tvar:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{k_d} \cdot \frac{2}{3} \cdot \cos \vartheta_k & -\frac{1}{k_q} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sin \vartheta_k & \frac{1}{k_0} \cdot \frac{1}{3} \\ \frac{1}{k_d} \cdot \frac{2}{3} \cdot \cos(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & -\frac{1}{k_q} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sin(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}) & \frac{1}{k_0} \cdot \frac{1}{3} \\ \frac{1}{k_d} \cdot \frac{2}{3} \cdot \cos(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) & -\frac{1}{k_q} \cdot \frac{2}{3} \cdot \sin(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}) & \frac{1}{k_0} \cdot \frac{1}{3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Volba koeficientů k_d , k_q , k_0 je libovolná a v odborné literatuře je možné se setkat s různými hodnotami. Podle jednotlivých členů matice (2.10) je patrné, že nejvýhodnější bude volba hodnot $k_d = k_q = \frac{2}{3}$ a $k_0 = \frac{1}{3}$. Takovou volbou se nám matice (2.10) zjednoduší.

Nyní budeme aplikovat transformační matici (2.8) na spřažené magnetické toky statoru. Výsledkem budou tyto tři rozepsané rovnice:

$$\psi_d = k_d \cdot \left[\psi_a \cdot \cos \vartheta_k + \psi_b \cdot \cos\left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \psi_c \cdot \cos\left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right] \quad (2.11)$$

$$\psi_q = -k_q \cdot \left[\psi_a \cdot \sin \vartheta_k + \psi_b \cdot \sin\left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \psi_c \cdot \sin\left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right] \quad (2.12)$$

$$\psi_0 = k_0 \cdot (\psi_a + \psi_b + \psi_c) \quad (2.13)$$

Do těchto rovnic nyní za jednotlivé toky dosadíme z matice (2.6) a po úpravě dostaneme:

$$\begin{aligned} \psi_d = & L_d \cdot i_d + \frac{3}{2} \cdot k_d \cdot M \cdot \left[i_A \cdot \cos(\vartheta_k - \vartheta) + i_B \cdot \cos\left(\vartheta_k - \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \right. \\ & \left. + i_C \cdot \cos\left(\vartheta_k - \vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \psi_q = & L_d \cdot i_q - \frac{3}{2} \cdot k_q \cdot M \cdot \left[i_A \cdot \sin(\vartheta_k - \vartheta) + i_B \cdot \sin\left(\vartheta_k - \vartheta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + \right. \\ & \left. + i_C \cdot \sin\left(\vartheta_k - \vartheta + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\psi_0 = L_0 \cdot i_0 \quad (2.16)$$

Kde platí:

$$\begin{aligned} L_d &= L_s + M_s \\ L_0 &= L_s - 2M_s \end{aligned} \quad (2.17)$$

Nyní musíme z rovnic (2.14) a (2.15) odstranit všechny periodické koeficienty. To můžeme provést pomocí stejné transformace (2.8). Ovšem v tomto případě musíme uvažovat, že transformační úhel ϑ_k je zde vlivem pohybu rotoru ve tvaru $\vartheta_k - \vartheta$. Při transformaci rotorových veličin podle (2.8) a pro $k_d=k_D$, $k_q=k_Q$, $k_0=k_0$ přejdou rovnice (2.14) až (2.16) na tvar:

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + L_{dD} \cdot i_D \quad (2.18)$$

$$\psi_q = L_d \cdot i_q + L_{dD} \cdot i_Q \quad (2.19)$$

$$\psi_0 = L_0 \cdot i_0 \quad (2.20)$$

Kde platí:

$$L_{dD} = L_{qQ} = \frac{3}{2} \cdot M \quad (2.21)$$

Použitím transformačních vztahů (2.8) pro rotorové veličiny můžeme dále určit transformované rovnice rotorových magnetických toků:

$$\psi_D = L_D \cdot i_D + L_{Dd} \cdot i_d \quad (2.22)$$

$$\psi_Q = L_D \cdot i_Q + L_{Qq} \cdot i_q \quad (2.23)$$

$$\psi_0 = L_0 \cdot i_0 \quad (2.24)$$

Kde platí:

$$\begin{aligned}
L_D &= L_r + M_r \\
L_0 &= L_r - 2M_r \\
L_{Dd} &= L_{Qq} = \frac{3}{2}M
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Dále se provede transformace napětových rovnic:

$$\begin{aligned}
u_d &= R_s \cdot i_d - \omega_k \cdot \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\
u_q &= R_s \cdot i_q + \omega_k \cdot \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \\
u_0 &= R_s \cdot i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \\
u_D &= R_r \cdot i_D - (\omega_k - \omega) \cdot \psi_Q + \frac{d\psi_D}{dt} \\
u_Q &= R_r \cdot i_Q + (\omega_k - \omega) \cdot \psi_D + \frac{d\psi_Q}{dt} \\
u_0 &= R_r \cdot i_0 + \frac{d\psi_0}{dt}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Úhel \mathcal{G}_k je možné volit libovolně. Jak již bylo uvedeno výše, použijeme transformaci do souřadnicové soustavy pevně svázané se synchronně otáčejícím se polem $\omega_k = \omega_s$, tedy $\mathcal{G}_k = \mathcal{G}_s$:

$$\begin{aligned}
u_d &= R_s \cdot i_d - \omega_s \cdot \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\
u_q &= R_s \cdot i_q + \omega_s \cdot \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \\
u_0 &= R_s \cdot i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \\
u_D &= R_r \cdot i_D - (\omega_s - \omega) \cdot \psi_Q + \frac{d\psi_D}{dt} \\
u_Q &= R_r \cdot i_Q + (\omega_s - \omega) \cdot \psi_D + \frac{d\psi_Q}{dt} \\
u_0 &= R_r \cdot i_0 + \frac{d\psi_0}{dt}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

K těmto rovnicím je ještě nutné připojit pohybovou rovnici ve tvaru:

$$m_i = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + \sum_r m_r \tag{2.28}$$

a dále ještě rovnici pro vnitřní (elektromagnetický) moment stroje:

$$Te = \frac{P_{ie}}{\omega_m} = p \cdot (\psi_{dr} \cdot i_q - \psi_{qr} \cdot i_d) \quad (2.29)$$

Rovnice (2.18) až (2.20), rovnice (2.22) až (2.24) a rovnice (2.27) až (2.29) pak tvoří úplnou soustavu rovnic asynchronního stroje pro okamžité hodnoty.

2.3 Implementace rovnic do prostředí MATLAB

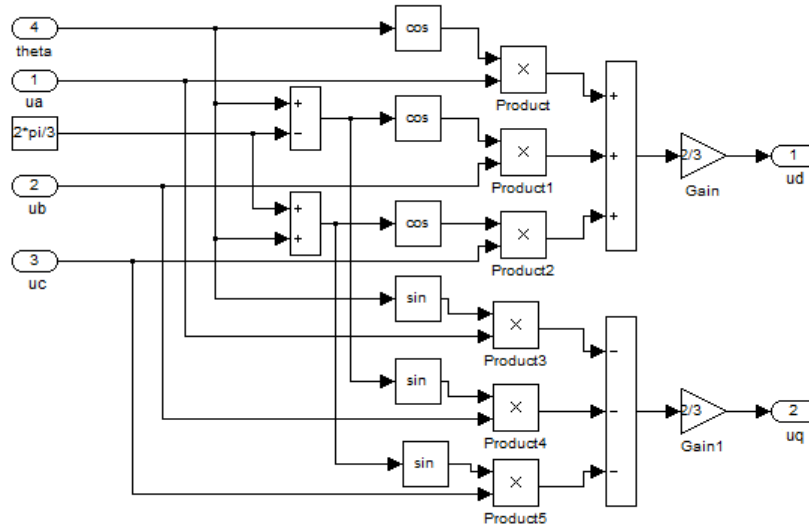
V programovém prostředí Matlab je pro modelování a simulaci provozu asynchronního stroje je v podstatě nutné vytvořit tři matematické subsystémy:

- Subsystém transformace $x_a, x_b, x_c \Rightarrow x_d, x_q$
- Subsystém asynchronního stroje
- Subsystém zpětné transformace $x_d, x_q \Rightarrow x_a, x_b, x_c$

Pro vytvoření subsystému transformace $x_a, x_b, x_c \Rightarrow x_d, x_q$ nejdříve podle (2.8) provedeme transformaci napětíových rovnic:

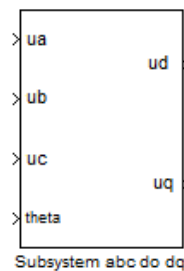
$$\begin{aligned} u_d &= \frac{2}{3} \cdot u_a \cdot \cos \vartheta_k + \frac{2}{3} \cdot u_b \cdot \cos \left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) + \frac{2}{3} \cdot u_c \cdot \cos \left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\ u_q &= -\frac{2}{3} \cdot u_a \cdot \sin \vartheta_k - \frac{2}{3} \cdot u_b \cdot \sin \left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) - \frac{2}{3} \cdot u_c \cdot \sin \left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Tyto rovnice nyní vytvoříme pomocí matematických bloků v programovém prostředí Matlab – Simulink:



Obr. 2.2 Blokové schéma transformace napěťových rovnic v prostředí Matlab – Simulink

Nyní už jen stačí všechny bloky označit kurzorem a v nástrojovém menu vybrat příkaz *Create Subsystem*. Tím dojde k vytvoření subsystému transformace $x_a, x_b, x_c \Rightarrow x_d, x_q$.

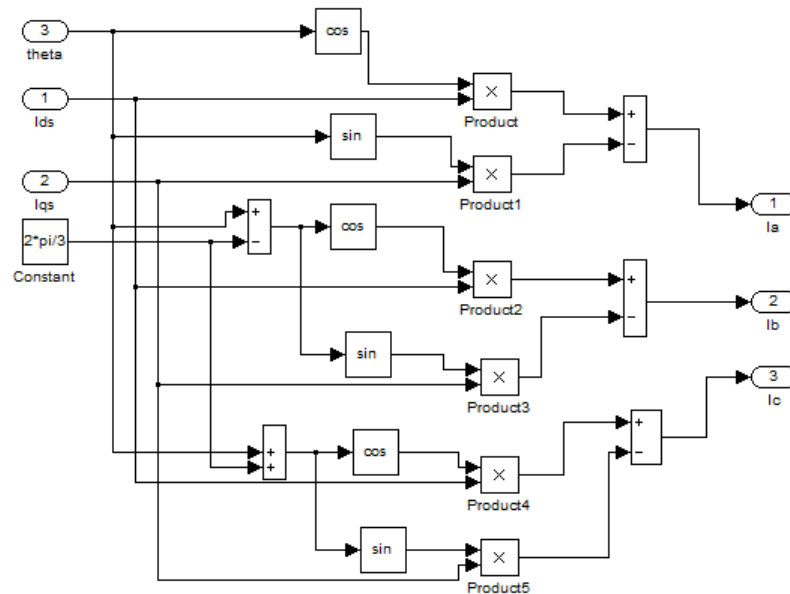


Obr. 2.3 Subsystém transformace do d, q souřadnic v prostředí Matlab - Simulink

Podobným způsobem budeme postupovat v případě vytváření subsystému zpětné transformace $x_d, x_q \Rightarrow x_a, x_b, x_c$. Výstupními veličinami ze subsystému asynchronního stroje by byly elektrické proudy v ortogonálním systému os d, q . Abychom však mohli sledovat průběhy satorových proudů i_a, i_b, i_c , musíme nejprve podle (2.10) odvodit proudové rovnice:

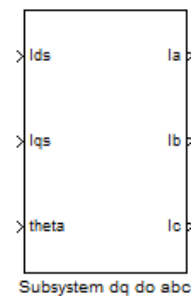
$$\begin{aligned}
 i_a &= i_d \cdot \cos \vartheta_k - i_q \cdot \sin \vartheta_k \\
 i_b &= i_d \cdot \cos \left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) - i_q \cdot \sin \left(\vartheta_k - \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) \\
 i_c &= i_d \cdot \cos \left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right) - i_q \cdot \sin \left(\vartheta_k + \frac{2 \cdot \pi}{3} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

Ty následně přepíšeme pomocí matematických bloků v prostředí Matlab – Simulink:



Obr. 2.4 Blokové schéma transformace proudových rovnic v prostředí Matlab - Simulink

Následuje tvorba samotného subsystému obdobným způsobem jako u transformace napěťových rovnic:



Obr. 2.5 Subsystém transformace do a, b, c soustavy v prostředí Matlab – Simulink

Nyní by již stačilo vytvořit subsystém asynchronního stroje a jednotlivé subsystémy spolu propojit. Tvorbou subsystému samotného asynchronního stroje se tato kapitola nezabývá.

3. MODELOVÁNÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI

Pro modelování přechodných dějů v asynchronním stroji je nutné odvodit náhradní schéma asynchronního stroje a dále určit jednotlivé prvky tohoto náhradního schématu. Hodnoty jednotlivých prvků určíme z měření odporu vinutí statoru, měření naprázdno při jmenovitém napětí a dále z měření nakrátko přepočítaného na jmenovité napětí.

Veškeré výpočty a měření nutné pro modelování a simulaci byly provedeny na stroji:

SIEMENS 1LA7106-0AB 750/1500 min⁻¹, 8/4 pól, D-YY, 50 Hz

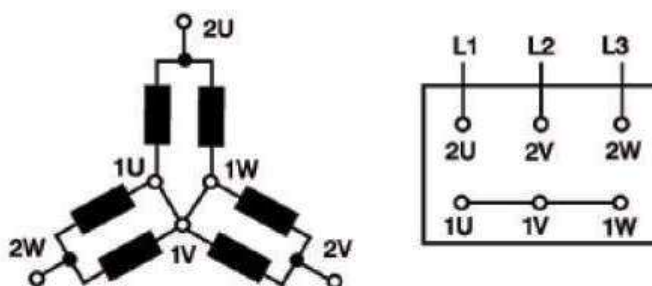
Jmenovitý výkon [kW]		Otáčky min ⁻¹	Jmenovitý proud při 400V [A]		Poměrný záběrový moment M_z/M_n		Poměrný záběrový proud I_k/I_n		Poměrný moment zvratu M_{max}/M_n		Moment setrvačnosti J kgm ²
750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹		750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	750 min ⁻¹	1500 min ⁻¹	
0,7	1,1	680/1360	2,1	3,25	1,7	1,6	3,3	3,5	2,0	1,9	0,0053

Obr. 3.1 Katalogové hodnoty použitého asynchronního stroje

V našem případě bylo uvažováno zapojení stroje do YY pro otáčky 1360 [min⁻¹].

3.1 Měření odporů statorového vinutí asynchronní stroje

Velikost odporu statorového vinutí je důležitým prvkem náhradního schématu asynchronního stroje, který potřebujeme pro modelování. Uvažujeme stroj v zapojení YY, čemuž odpovídá zapojení vinutí a svorkovnice podle obr. 3.2. Měření bylo provedeno ve studeném stavu čtyř-vodičovou metodou.

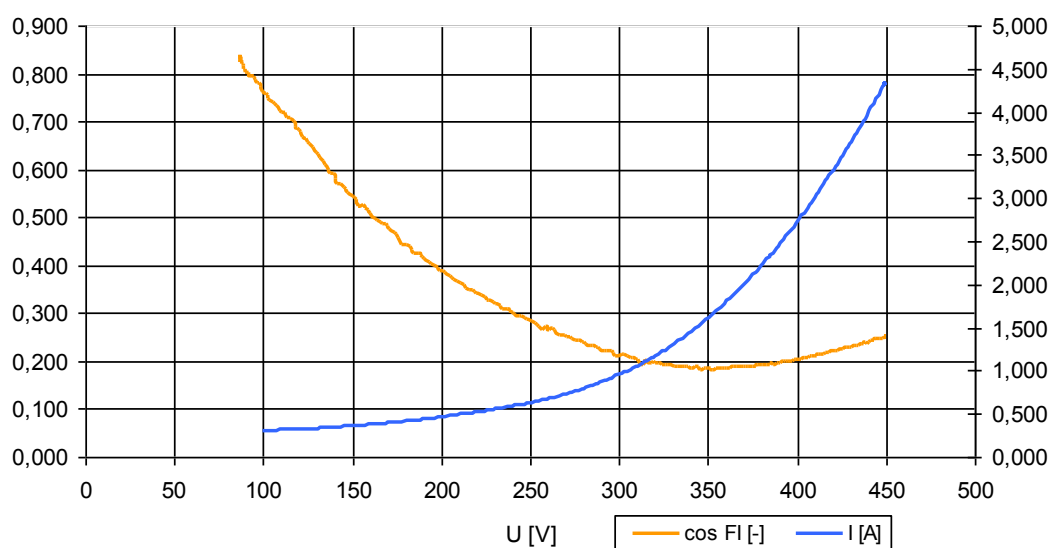


Obr. 3.2 Zapojení vinutí a svorkovnice elektromotoru při zapojení YY [14]

Velikost statorového odporu R_S mezi vytvořeným uzlem a jednotlivými fázemi (2U, 2V, 2W) byla změřena jako velikost 10,2 [Ω].

3.2 Měření asynchronního stroje naprázdno a nakrátko

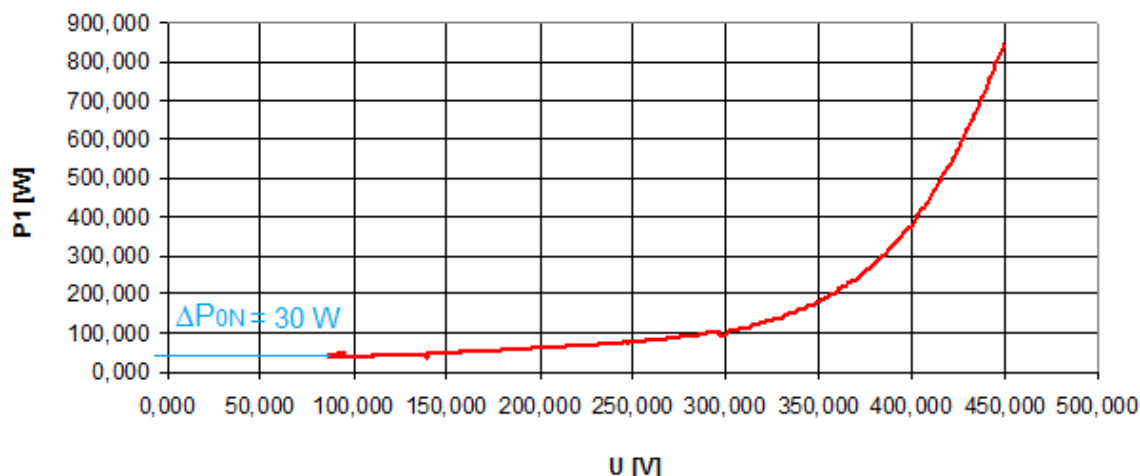
Hlavním účelem měření naprázdno bylo v kontextu této diplomové práce určení prvků příčné větve náhradního schématu X_μ a R_{Fe} . Hlavním účelem měření nakrátko pak určení prvků podélné větve náhradního schématu R a X_σ .



Obr. 3.3 Charakteristika stroje naprázdno, průběh statorového proudu a účinku

Tab. 3.1 Hodnoty naprázdno pro jmenovité napětí

U_0 [V]	I_{0N} [A]	$\cos \varphi_{0N}$ [-]
400	2,759	0,204



Obr. 3.4 Charakteristika stroje naprázdno, průběh příkonu stroje

Z naměřených hodnot proudu naprázdno při jmenovitém napětí I_{0N} a účinníku naprázdno při jmenovitém napětí $\cos \varphi_{0N}$ je dále nutné vyjádřit velikost magnetizačního proudu I_μ , který tvoří jalovou složku proudu naprázdno:

$$I_\mu = I_{0N} \cdot \sin \varphi_{0N}, \text{ kde } \sin \varphi_{0N} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{0N}} \quad (3.1)$$

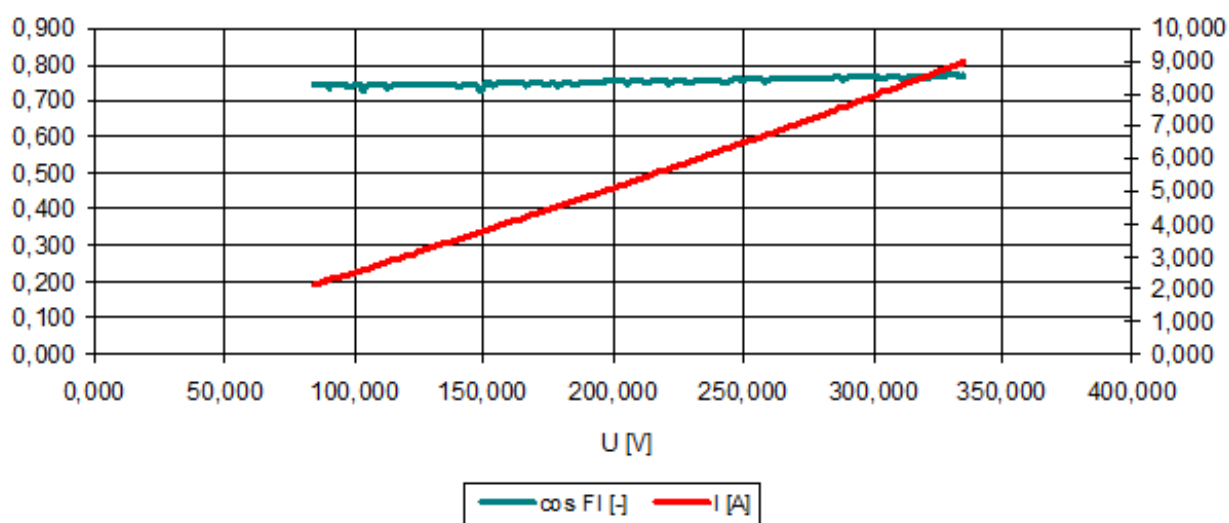
$$\sin \varphi_{0N} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{0N}} = \sqrt{1 - 0,204^2} = \underline{\underline{0,979}} \quad [-] \quad (3.2)$$

$$I_\mu = I_{0N} \cdot \sin \varphi_{0N} = 2,759 \cdot 0,979 = \underline{\underline{2,7}} \quad [A] \quad (3.3)$$

Dále je nutné z grafu příkonu naprázdno P_l určit ztráty ΔP_{0N} , které v podstatě představují příkon nutný ke krytí ztrát stroje, z něhož určíme moment ke krytí vlastních ztrát ve stavu naprázdno:

$$M_{ztrát} = \frac{\Delta P_{0N}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}} = \frac{30}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60}} = \underline{\underline{0,2}} \quad [Nm] \quad (3.4)$$

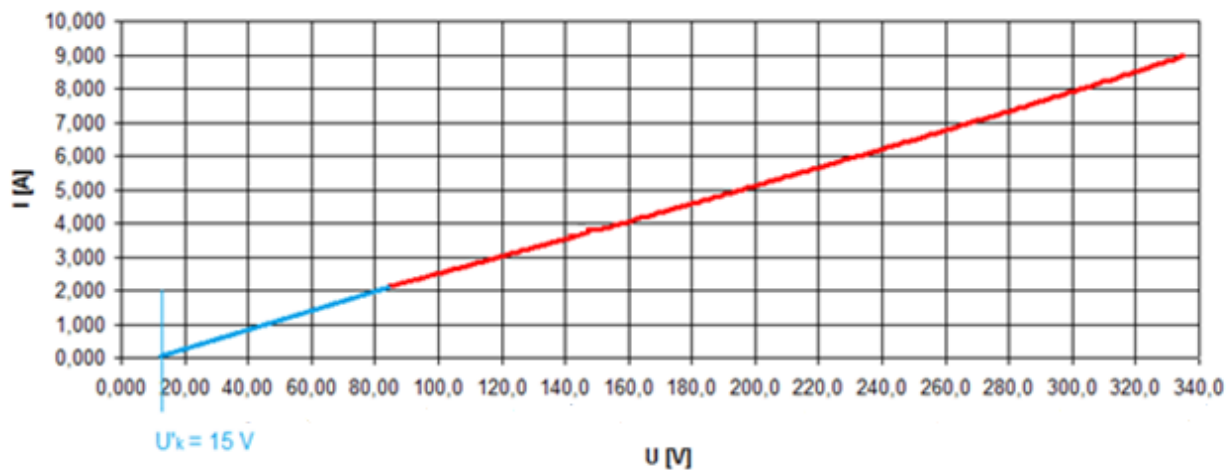
Tento moment ke krytí vlastních ztrát bude použit při modelování stroje ve stavu naprázdno.



Obr. 3.5 Charakteristika stroje nakrátko, průběh satorového proudu a účíníku

Tab. 3.2 Hodnoty nakrátko pro jmenovitý proud

I_K [A]	U_K [V]	$\cos \varphi_K$ [-]
3,25	129,647	0,746



Obr. 3.6 Určení proudu I_{KN} s uvažováním magnetického sycení stroje

Měření nakrátko bylo provedeno při napětí tak sníženém, aby statorem procházel proud I_K odpovídající jmenovitému (štitkovému) proudu I_N . Pro získání velikosti proudu I_{KN} , který by protékal statorem při jmenovitém napětí stroje U_N , je nutné provést přepočet, přičemž získání hodnoty U_K je patrné z grafu (Obr. 3.6) :

$$I_{KN} = I_K \cdot \frac{U_N - U'_K}{U_K - U'_K} = 3,25 \cdot \frac{400 - 15}{130 - 15} = \underline{\underline{10,91}} \text{ [A]} \quad (3.5)$$

Z naměřených hodnot (Tab. 3.2) určíme celkový činný odpor:

$$R_K = \frac{U_{Nf} \cdot \cos \varphi_K}{I_{KN}} = \frac{231 \cdot 0,746}{10,91} = \underline{\underline{15,8}} \text{ } [\Omega] \quad (3.6)$$

Tento odpor je složen z odporu fáze statorového vinutí R_s a odporu jedné fáze rotorového vinutí přepočítaného na stator R'_r :

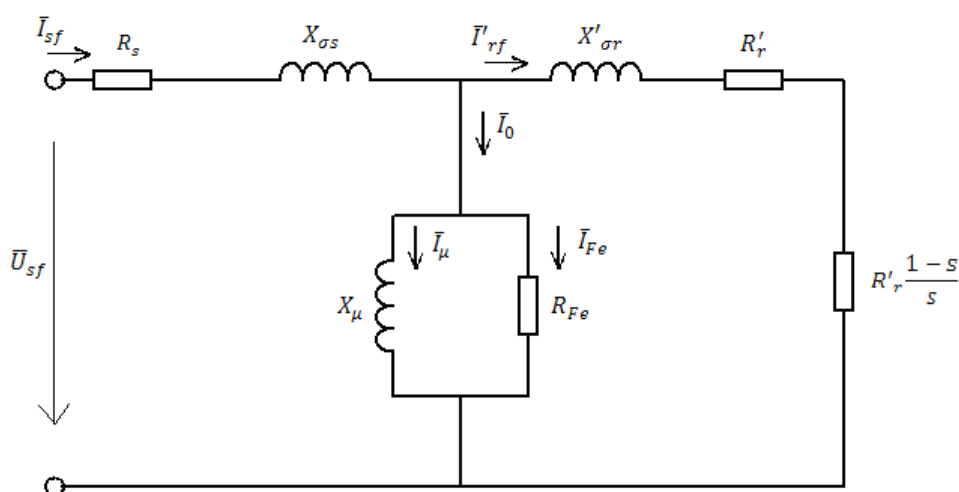
$$R_K = R_s - R'_r \quad (3.7)$$

Platí tedy:

$$R'_r = R_K - R_{sf} \quad (3.8)$$

Výpočet prvku R'_r je proveden v následující kapitole.

3.3 Náhradní schéma asynchronního stroje



Obr. 3.7 Náhradní schéma asynchronního stroje

Podélnou větev náhradního schématu představuje odpor statorového vinutí R_s , rozptylová reaktance statoru $X_{\sigma s}$ a dále rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator $X'_{\sigma r}$ a odpor rotoru přepočtený na stator R'_r . Výraz $R'_r \frac{1-s}{s}$ představuje zátěž. Příčná impedance

náhradního schématu je tvořena magnetizační reaktancí X_μ a odporem R_{Fe} představujícím ztráty v železe.

3.4 Prvky náhradního schématu a jejich výpočet

Magnetizační reaktance X_μ :

$$X_\mu = \frac{U_{Nf}}{I_\mu} = \frac{231}{2,7} = \underline{\underline{85,55}} \text{ } [\Omega] \quad (3.9)$$

Magnetizační indukčnost L_μ :

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi f} = \frac{85,55}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{0,27}} \text{ } [H] \quad (3.10)$$

Ztráty v železe:

$$R_{Fe} = \frac{U_{Nf}}{I_{Fe}} = \frac{231}{0,563} = \underline{\underline{410,3}} \text{ } [\Omega] \quad (3.11)$$

Ztrátový proud (proud od ztrát v železe):

$$I_{Fe} = I_{0N} \cdot \cos \varphi_{0N} = 2,759 \cdot 0,204 = \underline{\underline{0,563}} \text{ } [A] \quad (3.12)$$

Z měření nakrátko (kdy je skluz $s = 1$) je nutné při zanedbání magnetizační reaktance určit celkový činný odpor (výpočet 3.6). Zároveň je nutné změřit odpor jedné fáze statoru R_s (kap. 3.1). Když známe hodnoty těchto dvou odporů, můžeme přistoupit k výpočtu odporu rotorového vinutí přepočteného na stator:

$$R'_r = R_k - R_s = 15,8 - 10,2 = \underline{\underline{5,6}} \text{ } [\Omega] \quad (3.13)$$

Z hodnot nakrátko určíme celkovou rozptylovou reaktanci X_σ , která je součtem rozptylové reaktance statoru $X_{\sigma s}$ a rozptylové reaktance rotoru přepočítaného na stator $X'_{\sigma r}$:

$$X_\sigma = X_{\sigma s} + X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(\frac{U_{Nf}}{I_{kN}}\right)^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{231}{10,91}\right)^2 - 15,80^2} = \underline{\underline{14,1}} \text{ } [\Omega] \quad (3.14)$$

Rozdělit celkovou rozptylovou reaktanci X_σ na reaktanci statoru $X_{\sigma s}$ a reaktanci rotoru přepočítanou na stator $X'_{\sigma r}$ je možné pouze odhadem, obvykle na dva stejné díly. Tedy:

$$X_{\sigma s} = X'_{\sigma r} = \frac{X_\sigma}{2} = \frac{14,1}{2} = \underline{\underline{7,05}} \text{ } [\Omega] \quad (3.15)$$

Z těchto hodnot je nutné vypočítat hodnoty rozptylových indukčností, které budou potřeba pro simulování přechodných jevů:

$$L_\sigma = \frac{X_\sigma}{2\pi f} = \frac{14,1}{2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{\underline{0,045}} \text{ } [H] \quad (3.16)$$

$$L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = \frac{L_\sigma}{2} = \frac{0,045}{2} = \underline{\underline{0,0225}} \text{ } [H] \quad (3.17)$$

Pro pozdější nastavení simulačního modelu je ještě nutné v rámci této kapitoly určit z katalogových hodnot stroje jmenovitý moment M_N a zdánlivý jmenovitý příkon stroje S_N :

$$M_N = \frac{P}{2\pi \frac{n}{60}} = \frac{1100}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1360}{60}} = \underline{\underline{7,72}} \text{ } [Nm] \quad (3.18)$$

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 3,25 = \underline{\underline{2251,66}} \text{ } [VA] \quad (3.19)$$

Závěrem je ještě možné vypočítat některé parametry stroje, o kterých již bylo pojednáno v kapitole 1.2 a které nám mohou sloužit pro porovnání s výsledky simulací a měření:

$$t_a = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{n}{M_N} = 0,018 \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{1360}{7,72} = \underline{\underline{0,33}} \text{ } [s] \quad (3.20)$$

$$M_p = M_z \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \varphi_k}\right) = 12,352 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,746}\right) = \underline{\underline{28,91}} \text{ } [Nm] \quad (3.21)$$

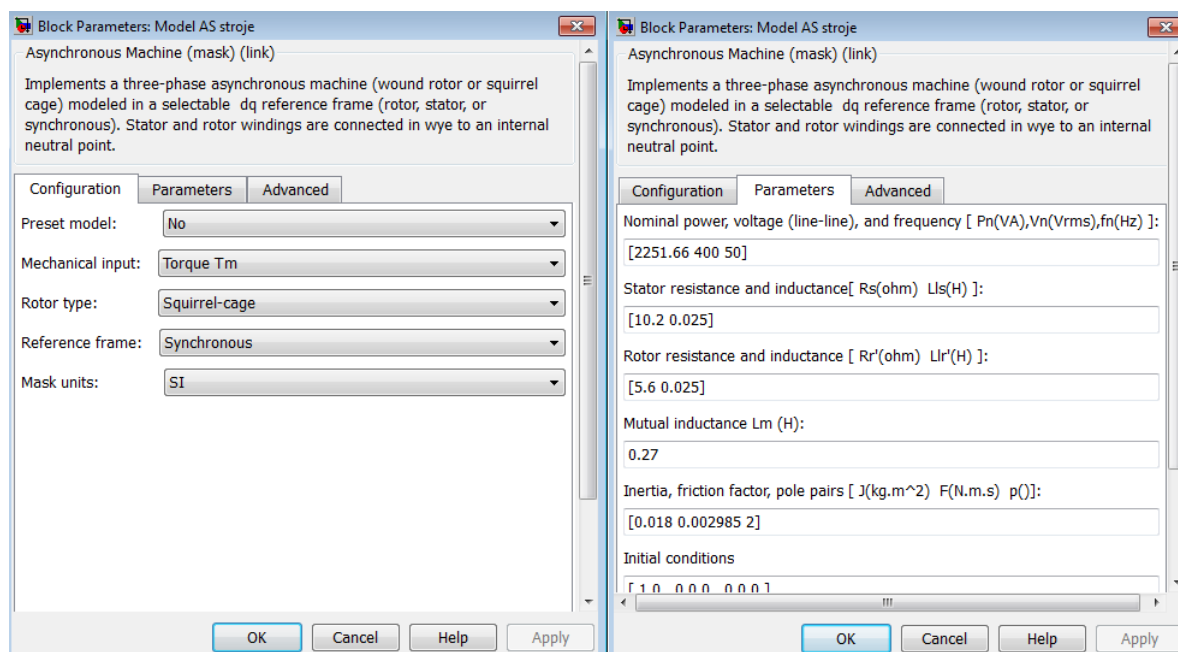
Parametry vypočtené v této kapitole budeme potřebovat pro nastavení modelu asynchronního stroje v prostředí MATLAB Simulink.

3.5 Sestavení simulačního modelu v prostředí Matlab – Simulink

Jak už bylo v úvodu 2. kapitoly zmíněno, v prostředí Matlab mohou uživatelé realizovat simulační modely buďto na bázi čistě matematické, nebo formou elektrotechnických komponentů. V zahraniční odborné literatuře a stejně tak na samotném diskusním fóru společnosti The MathWorksTM (společnost vyvíjející programové prostředí Matlab) lze nalézt hned několik matematických modelů asynchronního stroje. Proto jsem se rozhodl realizovat modelování a simulaci na asynchronním stroji formou elektrického obvodu za použití modelu asynchronního stroje, který je součástí knihovny Matlab – Simulink.

Za velkou výhodu takto vytvořeného modelu považuji přehlednost a tedy snadnou orientaci uživatele a rovněž univerzálnost – v modelu lze snadno měnit parametry stroje, parametry a způsob napájení, vlastnosti vnějšího zatížení apod. Tím lze tedy model přizpůsobit dle požadavků jakéhokoliv uživatele. Schéma vytvořeného a pro simulace ve čtvrté kapitole použitého modelu je na obr. 3.8.

Po sestavení simulační modelu je ještě nutné nastavit parametry zkoumaného asynchronního stroje (obr. 3.9):



Obr. 3.9 Nastavení parametrů zkoumaného asynchronního stroje v programu Matlab - Simulink

V záložce *Configuration* je nutné nastavit druh mechanické síly působící na hřídel rotoru (je možné nastavit mechanický moment, nebo úhlovou rychlost), dále druh rotoru (vinutý, klecový) a konečně druh souřadnicové soustavy (soustava pevně svázaná s rotorem, svázaná se statorem, nebo svázaná se synchronně se otáčejícím polem).

V záložce *Parameters* se již nastavují samotné hodnoty prvků náhradního schématu stroje (kap. 3.4). Z katalogu výrobce stroje (obr. 3.1) je ještě nutné zjistit hodnotu momentu setrvačnosti J . V našem případě je ještě nutné k této hodnotě přičíst moment setrvačnosti dynamometru, s kterým je zkoumaný stroj pevně spojen (obr. 5.1). Hodnota jmenovitého výkonu (*Nominal power*) je myšlena jako velikost zdánlivého příkonu stroje (výpočet 3.19).

4. SIMULACE PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI

V této kapitole budou provedeny simulace provozních stavů stejného asynchronního motoru, na kterém jsem realizoval měření (obr. 3.1). Použitý simulační model je na obr. 3.8.

Poznámka: Průběhy statorových (rotorových) proudů jsou v grafech vykresleny jako hodnoty maximální. V následných doprovodných textech a vyhodnoceních jsou již tyto hodnoty přepočteny na hodnoty efektivní.

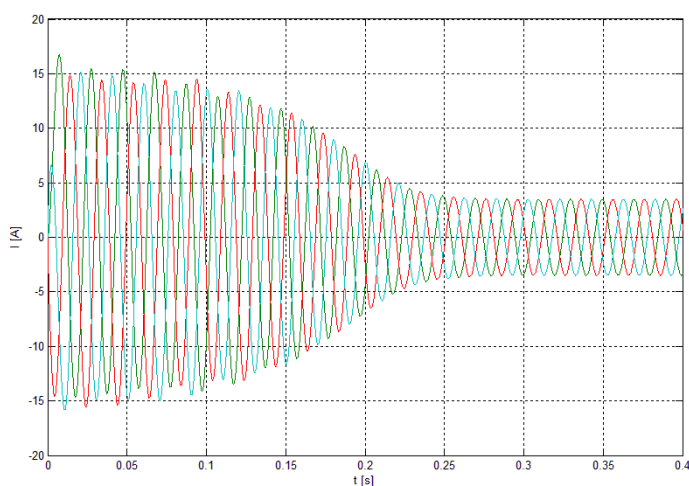
4.1 Připojení a odpojení asynchronního motoru od sítě bez zátěže

Nastavení modelu:

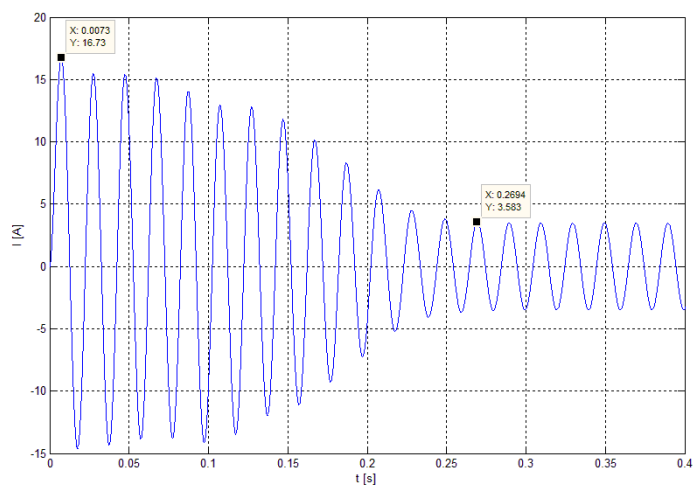
Asynchronní elektromotor je v provozu naprázdno, hřídel rotoru je tedy volný. Ve skutečnosti však musíme uvažovat, že rotor je zatěžován zatěžovacím momentem, který je roven momentu ke krytí svých ztrát (výpočet 3.4). V modelu je tedy nutné nastavit zatěžovací moment 0,2 [Nm].

Charakteristiky:

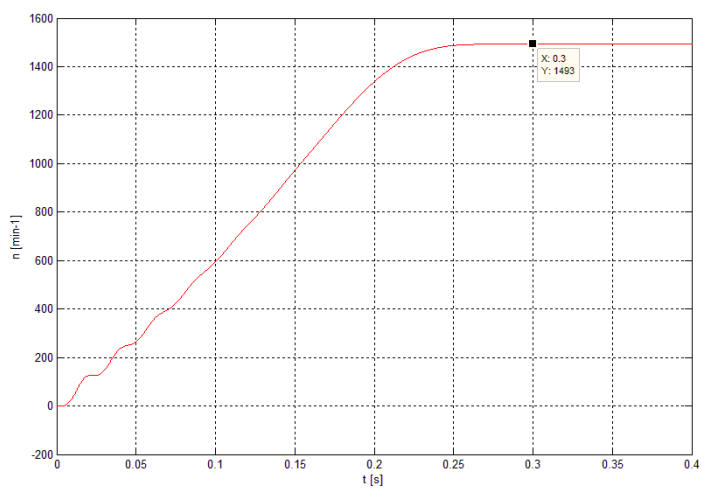
4.1.1 Provoz při jmenovitém napájecím napětí $U_N = 400V$



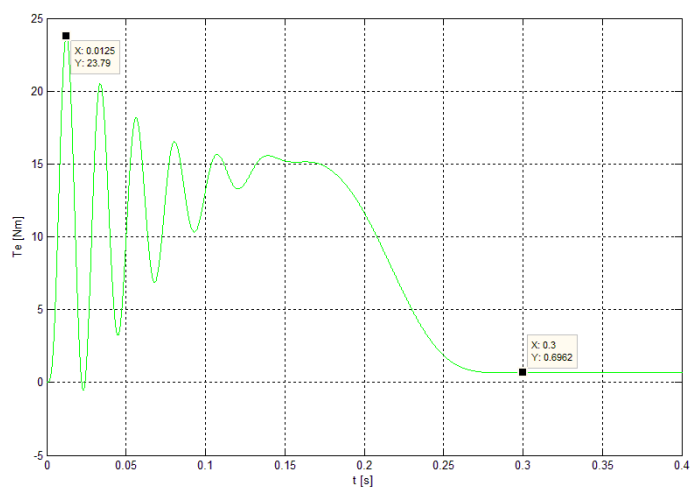
Obr. 4.1 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při U_N



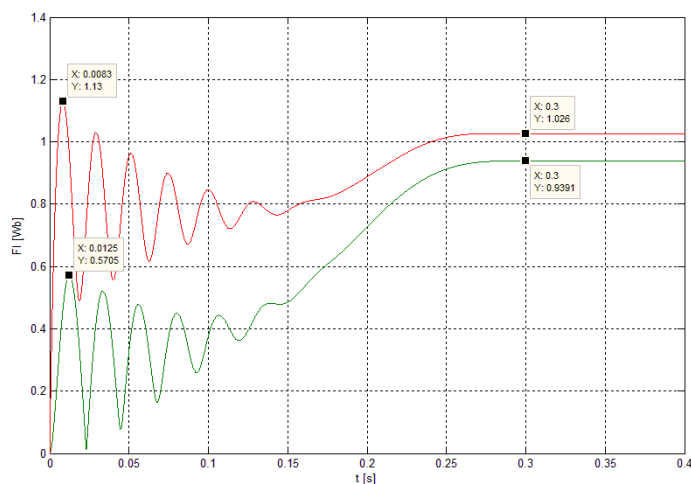
Obr. 4.2 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při U_N



Obr. 4.3 Průběh otáček při připojení stroje na síť při U_N

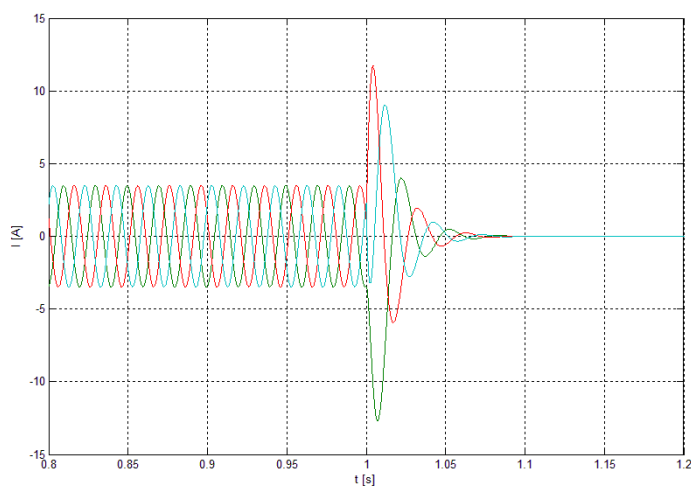


Obr. 4.4 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při U_N

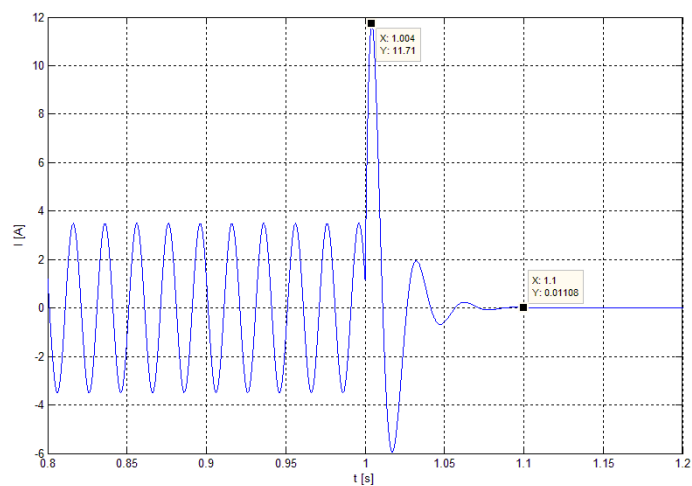


Obr. 4.5 Průběh statorového a rotorového magnetického toku při připojení stroje na síť při U_N

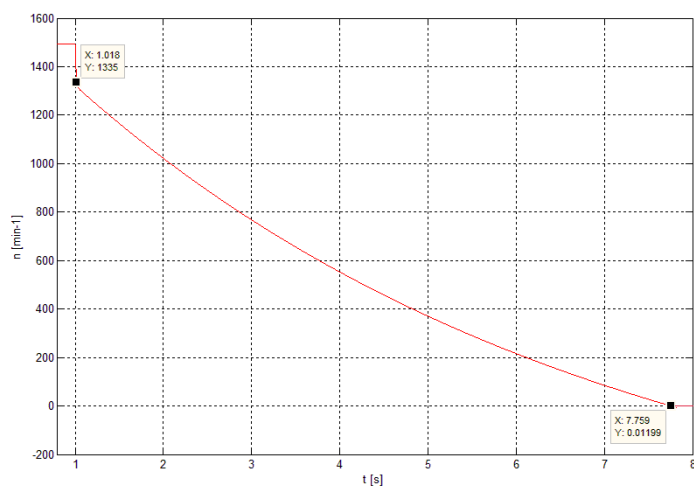
Na obrázku 4.1 jsou patrné průběhy statorových proudů při zapnutí stroje na síť. Na obrázku 4.2 je pak detailně vynesena charakteristika statorového proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,3 [ms] záběrný proud velikosti 11,83 [A]. Můžeme konstatovat, že v čase 0,26 [s] jsou již proudové rázy ukončeny a vinutím již protéká ustálený proud 2,53 [A]. Z obrázku 4.3 je patrné, že nárůst rychlosti motoru je hladký a již v čase 0,26 [s] dosahuje konstantní hodnoty 1493 [min⁻¹]. Na obrázku 4.4 je patrné, že při připojení stroje na síť dosáhl momentový ráz hodnoty 23,79 [Nm]. Poté došlo k rychlému ustálení momentu, kdy již od 0,3 [s] stroj vyvíjel pouze elektromagnetický moment ke krytí vlastních ztrát 0,696 [Nm]. Na obrázku 4.5 jsou patrné průběhy statorového a rotorového magnetického toku, jejichž ustálené hodnoty jsou 1,026 [Wb] a 0,939 [Wb].



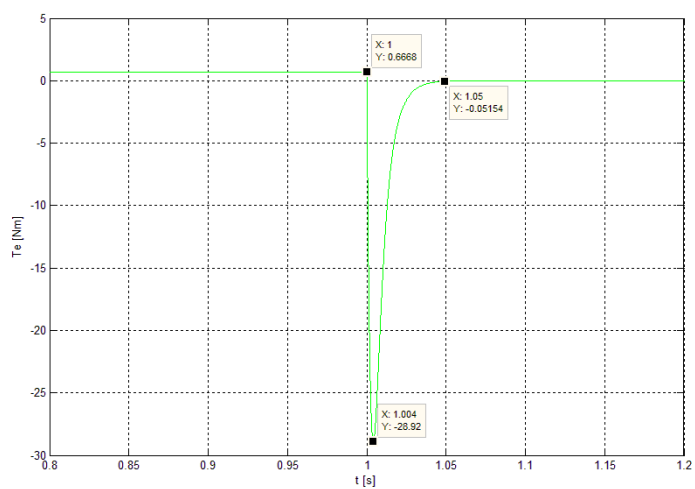
Obr. 4.6 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při U_N



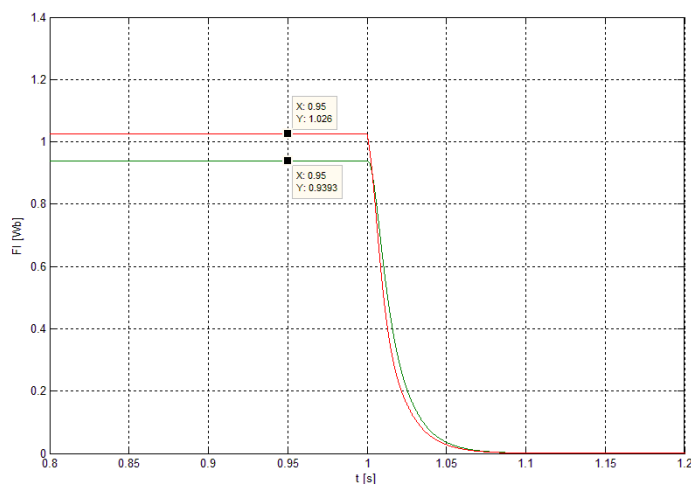
Obr. 4.7 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při U_N



Obr. 4.8 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při U_N



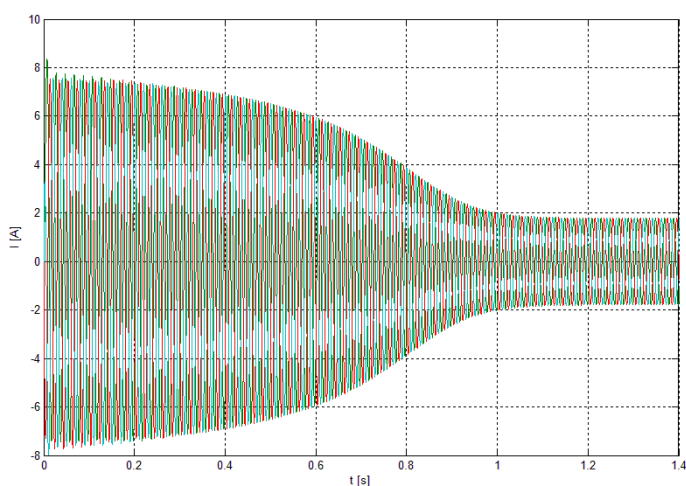
Obr. 4.9 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při U_N



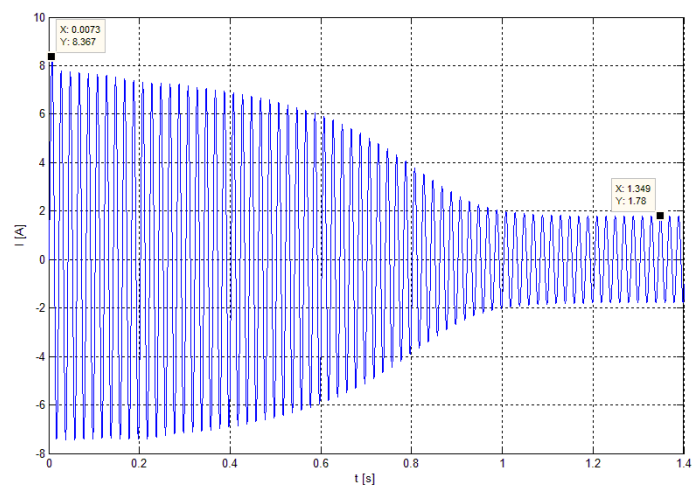
Obr. 4.10 Průběh statorového a rotorového magnetického toku při odpojení stroje od sítě při U_N

Na obrázku 4.6 jsou patrné průběhy statorových proudů při vypnutí stroje na síť. Na obrázku 4.7 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při vypnutí stroje dosahuje v čase 1,004 [s] proudový ráz velikosti 8,28 [A]. Poté již dochází k rychlému klesání proudových zákmitů, kdy za dobu 100 [ms] od chvíle vypnutí je již proud stroje nulový. Z obrázku 4.8 je patrné, že v okamžiku vypnutí dochází k prudkému poklesu otáček. Za dobu 18 [ms] klesly otáčky z hodnoty 1493 [min-1] na hodnotu 1335 [min-1]. Poté je již patrný pomalejší pokles otáček. V době 7,76 [s] jsou již otáčky motoru nulové. Z grafu 4.9 lze odečíst momentový zákmit o velikosti -28,92 [Nm]. Na obrázku 4.10 jsou patrné průběhy statorového a rotorového magnetického toku.

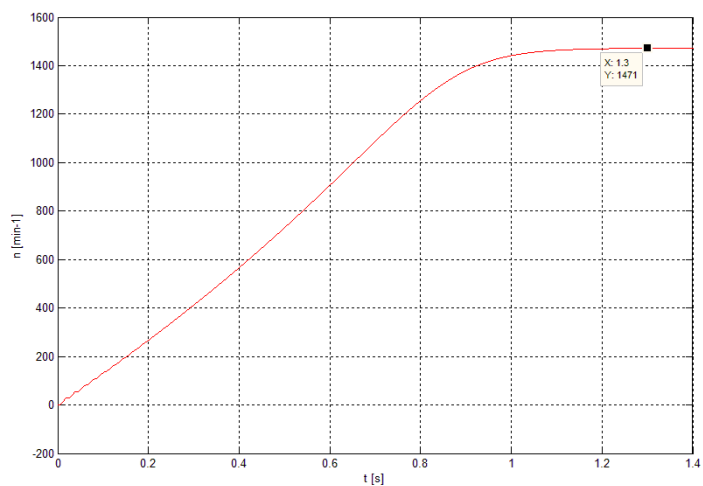
4.1.2 Provoz při sníženém napájecím napětí na 50% U_N



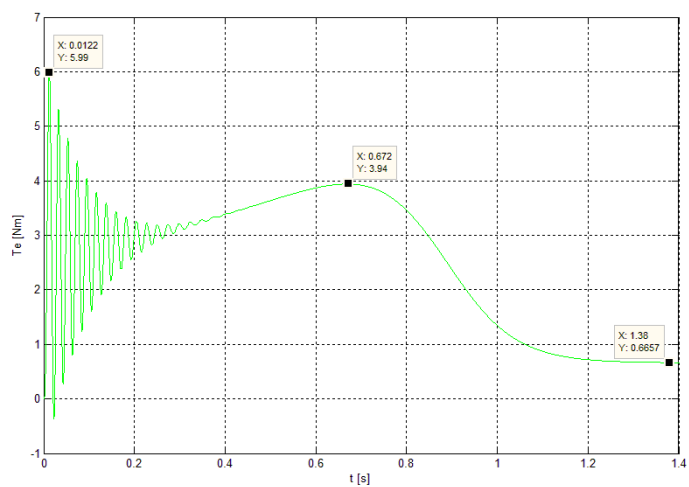
Obr. 4.11 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při $0,5U_N$



Obr. 4.12 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při $0,5U_N$

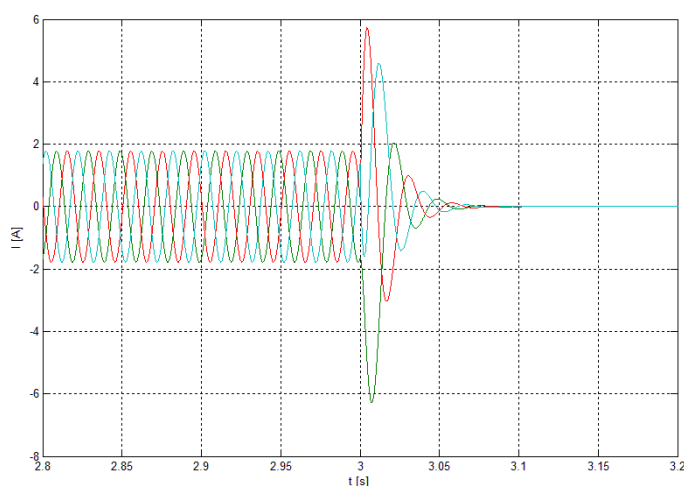


Obr. 4.13 Průběh otáček při připojení stroje na síť při $0,5U_N$

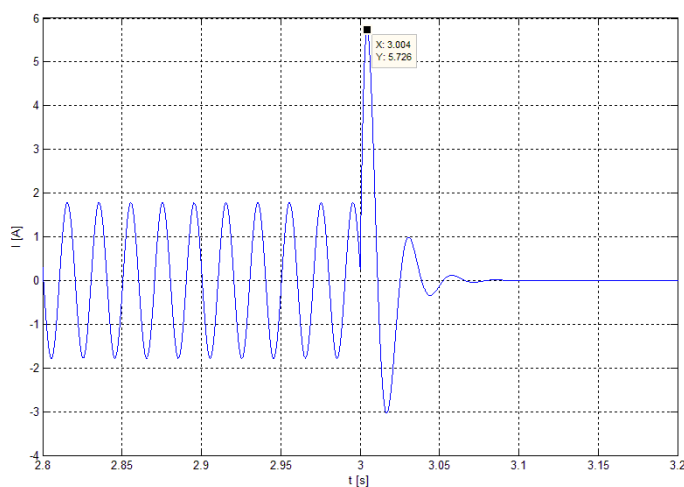


Obr. 4.14 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při $0,5U_N$

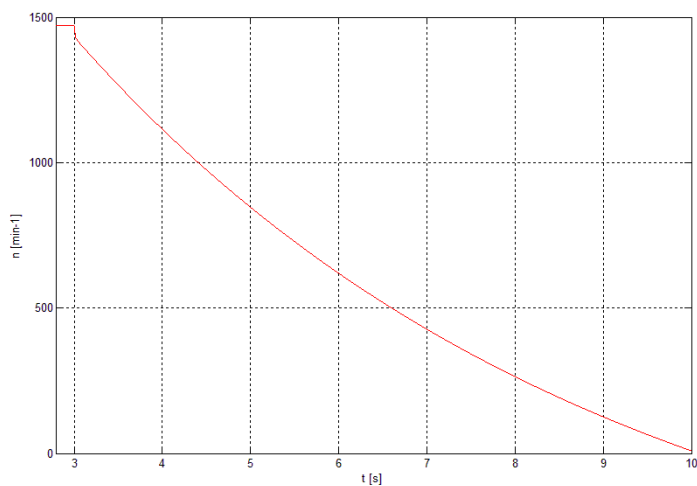
Na obrázku 4.11 jsou patrné průběhy statorových proudů při připojení stroje na síť při sníženém napájecím napětí. Na obrázku 4.12 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,3 [ms] záběrný proud velikosti 5,92 [A]. V čase 1 [s] již dochází k ustálení proudu, jehož velikost je 1,26 [A]. Z obrázku 4.13 je patrné, že rychlost motoru stoupá pomaleji a k ustálení rychlosti dochází v 1,2[s]. Otáčky v ustálení dosahují rychlosti 1471 [min⁻¹]. Z obrázku 4.14 je patrné, že při připojení stroje na síť se sníženým napětím je četnost momentových zákmitů větší. Z grafu je patrný moment zvratu M_{max} velikosti 3,94 [Nm]. K ustálení elektromagnetického momentu na hodnotu 0,66 [Nm] dochází až v čase 1,2 [s].



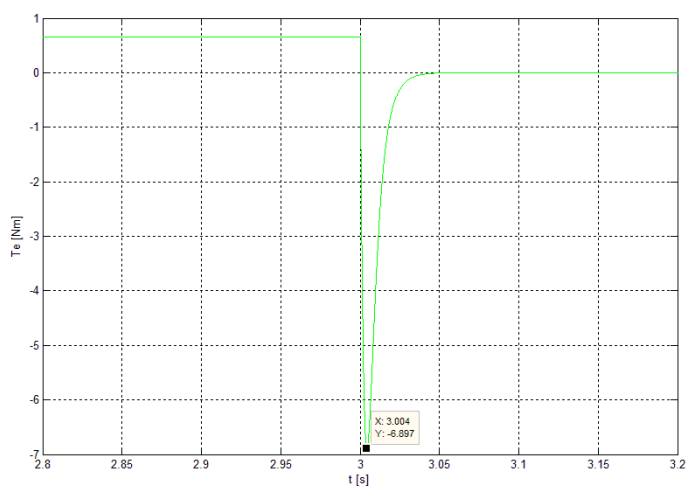
Obr. 4.15 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při $0,5U_N$



Obr. 4.16 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při $0,5U_N$



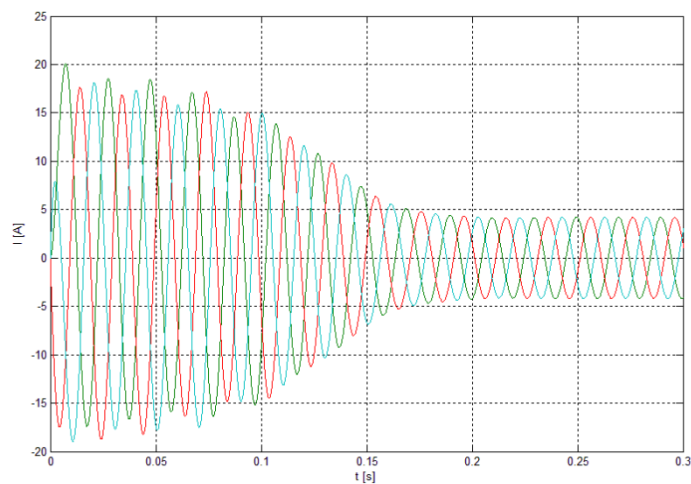
Obr. 4.17 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při $0,5U_N$



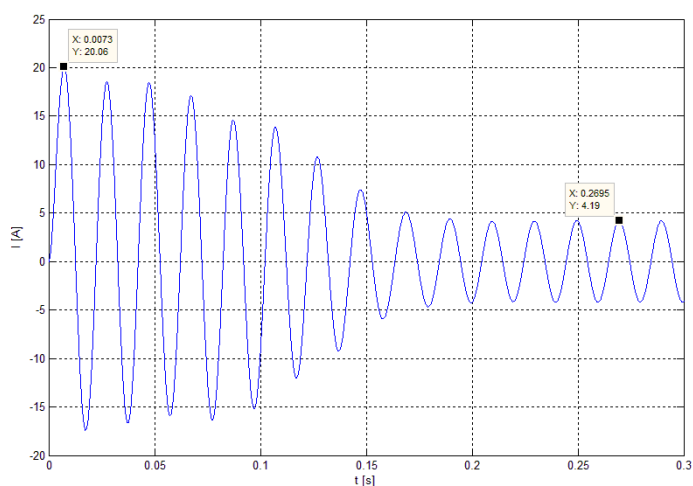
Obr. 4.18 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při $0,5U_N$

Na obrázku 4.15 jsou patrné průběhy statorových proudů při vypnutí stroje od sítě při sníženém napájecím napětí. Na obrázku 4.16 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při vypnutí stroje došlo v čase 1,004 [s] k proudovému rázu velikosti 4 [A]. Z grafu 4.17 je patrné, že k zastavení motoru dojde po 7 sekundách. Na obrázku 4.18 je patrné, že při odpojení stroje od sítě dosáhl momentový ráz hodnoty -6,9 [Nm].

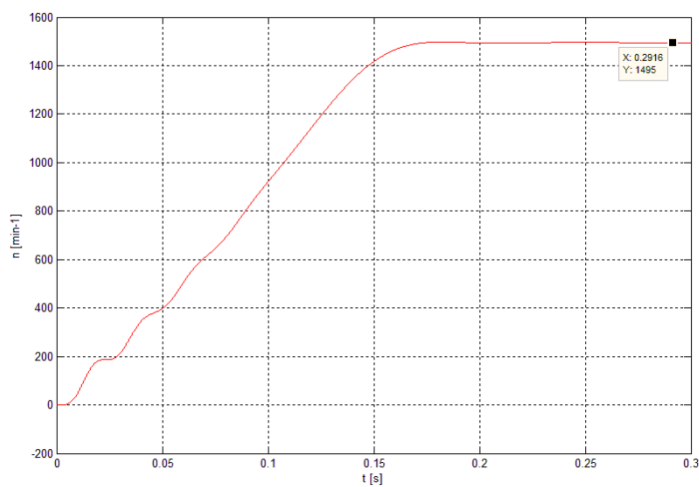
4.1.3 Provoz při zvýšeném napájecím napětí na 120% U_N



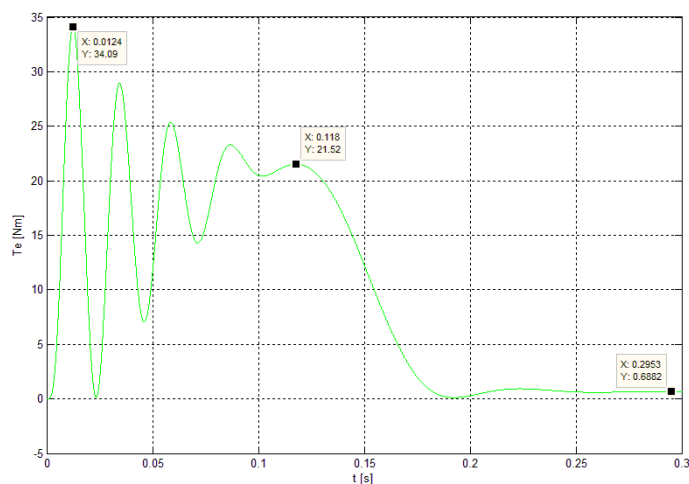
Obr. 4.19 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při $1,2U_N$



Obr. 4.20 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

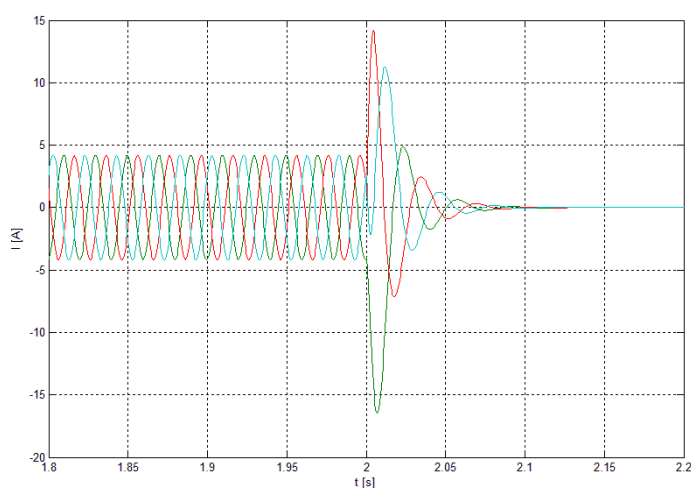


Obr. 4.21 Průběh otáček při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

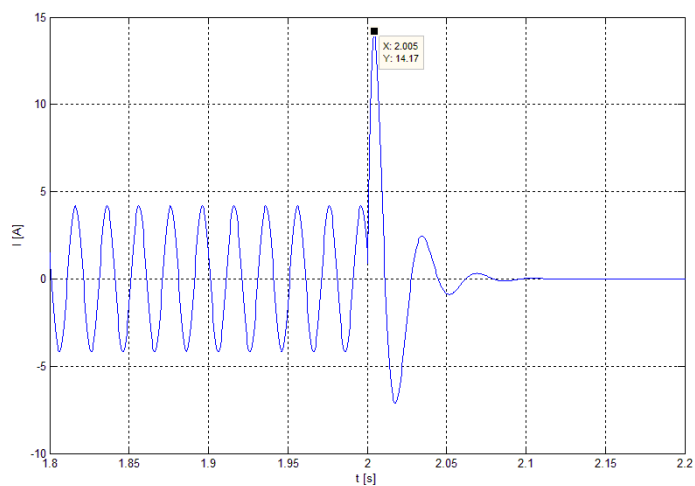


Obr. 4.22 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

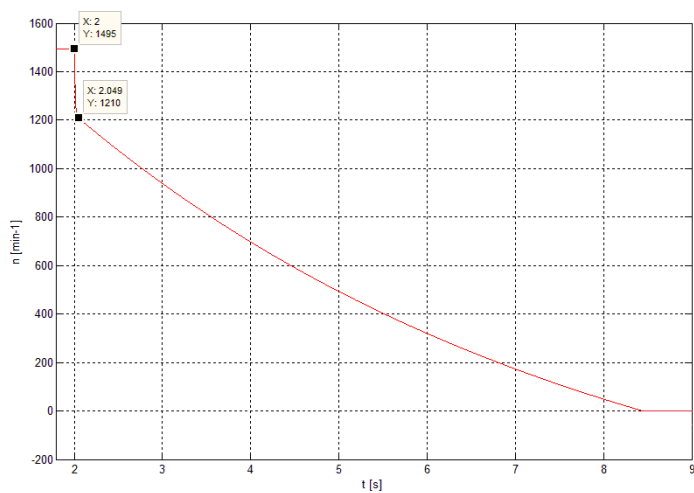
Na obrázku 4.19 jsou patrné průběhy statorových proudů při připojení stroje na síť při zvýšeném napájecím napětí. Na obrázku 4.20 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,3 [ms] záběrný proud velikosti 14,18 [A]. Můžeme konstatovat, že v čase 0,2 [s] jsou již proudové rázy ukončeny a vinutím již protéká ustálený proud 2,96 [A]. Z obrázku 4.21 je patrné, že nárůst rychlosti motoru je rychlý, k ustálení dochází v čase 0,2 [s], kdy dosahují otáčky konstantní hodnoty 1495 [min⁻¹]. Na obrázku 4.22 je patrné, že při připojení stroje na síť dosáhl momentový ráz hodnoty 34,09 [Nm], poté došlo k rychlému ustálení na hodnotu odpovídající momentu ke krytí vlastních ztrát.



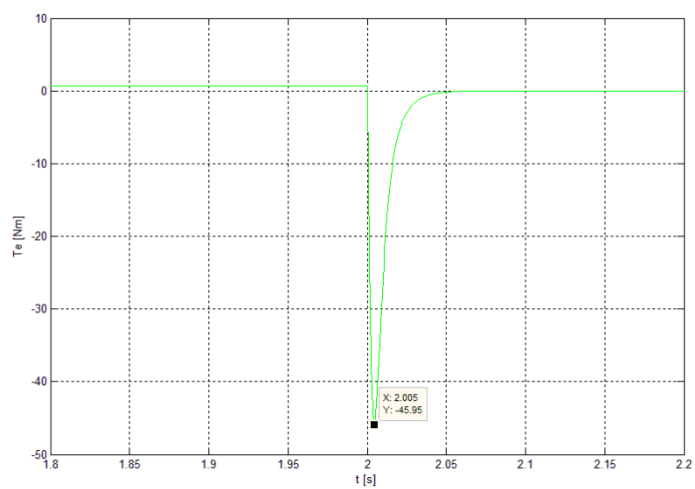
Obr. 4.23 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.24 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.25 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.26 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$

Na obrázku 4.23 jsou patrné průběhy statorových proudů při odpojení stroje od sítě při zvýšeném napájecím napětí. Na obrázku 4.24 je detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při vypnutí dosahuje v čase 2,004 [s] proudový náraz velikosti 10,02 [A]. Z obrázku 4.25 je patrné, že v okamžiku vypnutí dochází k prudkému poklesu otáček. Za dobu 49 [ms] klesly otáčky z hodnoty 1495 [min⁻¹] na hodnotu 1210 [min⁻¹]. Poté je již patrný pomalejší pokles otáček. V době 8,5 [s] jsou již otáčky motoru nulové. Na obrázku 4.26 je patrné, že při odpojení stroje od sítě dosáhl momentový ráz hodnoty -45,92 [Nm].

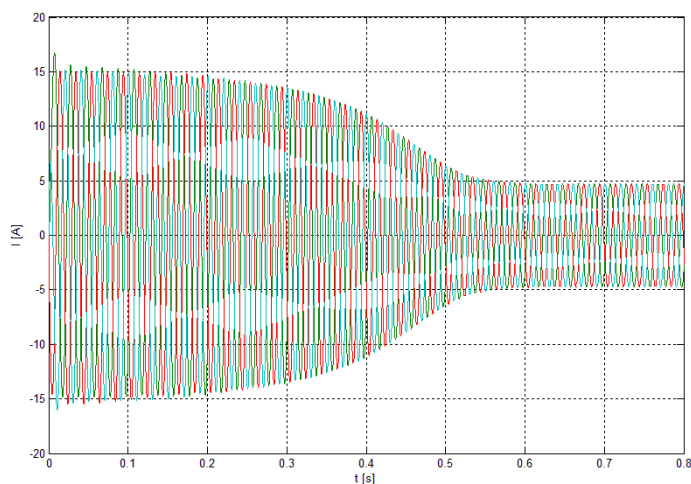
4.2 Připojení a odpojení asynchronního motoru od sítě s plným zatížením

Nastavení modelu:

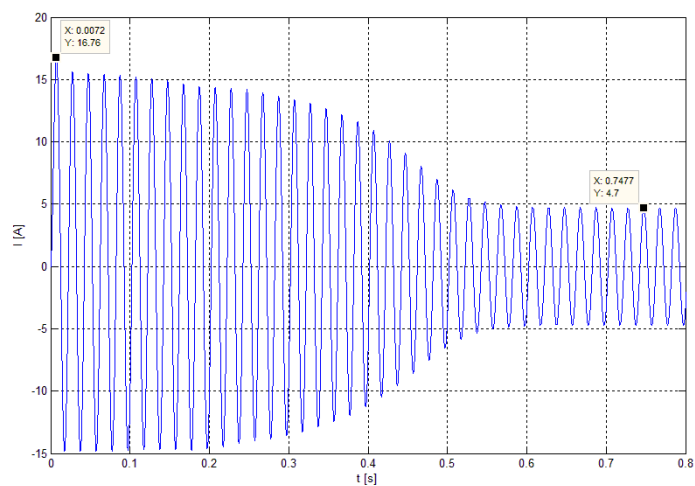
Asynchronní elektromotor je připojen do zatížení, které je rovno jmenovitému momentu elektromotoru (výpočet 3.18). Vnější zatížení rotoru je tedy nastaveno na hodnotu 7,72 [Nm].

Charakteristiky:

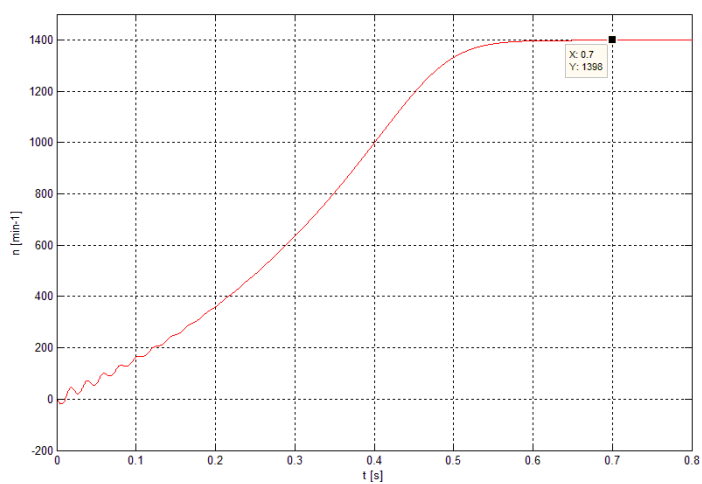
4.2.1 Provoz při jmenovitém napájecím napětí $U_N = 400\text{V}$



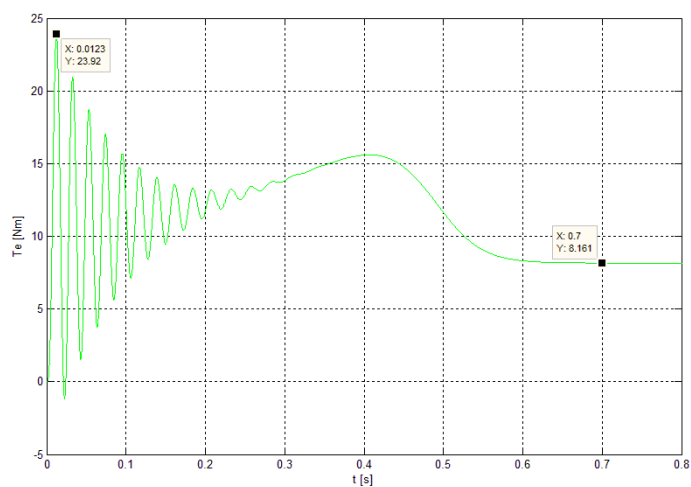
Obr. 4.27 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při U_N



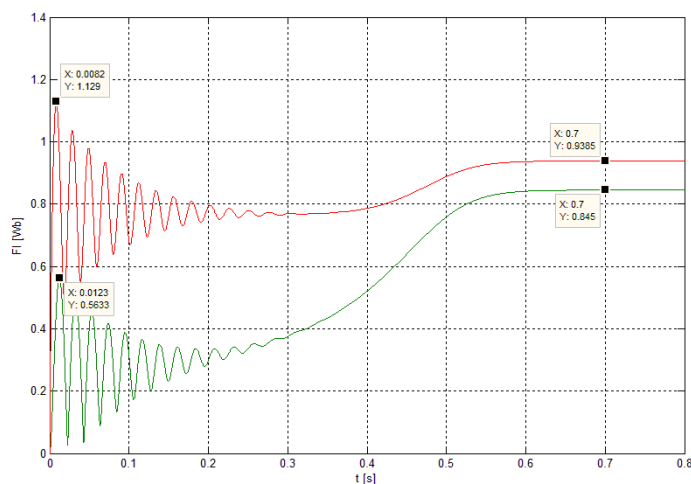
Obr. 4.28 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při U_N



Obr. 4.29 Průběh otáček při připojení stroje na síť při U_N

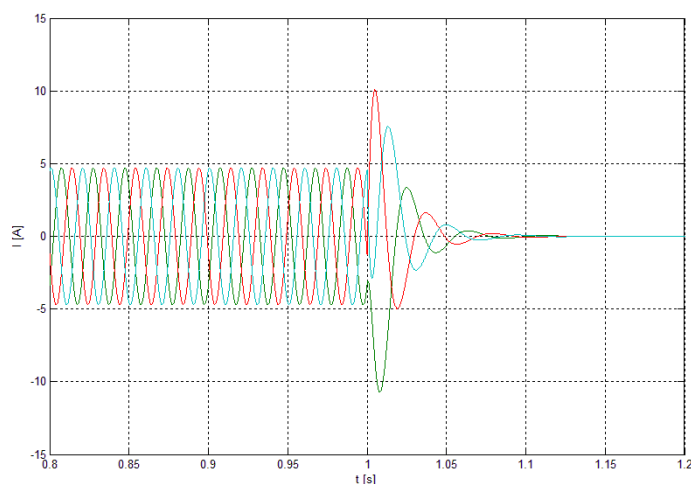


Obr. 4.30 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při U_N

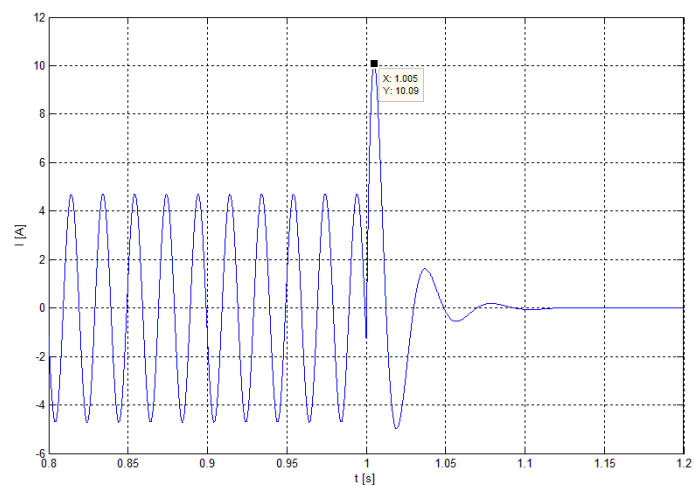


Obr. 4.31 Průběh satorového a rotorového magnetického toku při připojení stroje k síti při U_N

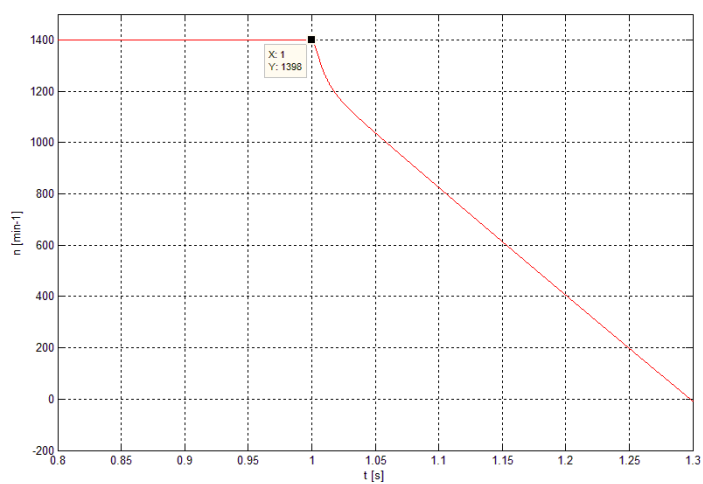
Na obrázku 4.27 jsou patrné průběhy satorových proudů při zapnutí stroje na síť. Na obrázku 4.28 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,2 [ms] záběrný proud velikosti 11,85 [A]. Můžeme konstatovat, že rozběh motoru trval do doby 0,6 [s]. V této době došlo k ustálení proudu na hodnotu 3,32 [A]. Z obrázku 4.29 je patrné, že nárůst rychlosti motoru je doprovázen počátečními nepatrnými zákmity, přičemž první zákmit dokonce dosahuje záporné hodnoty. V čase 0,7 [s] je již rychlost stroje ustálená na hodnotě 1398 [min⁻¹]. Na obrázku 4.30 je patrné, že při připojení stroje na síť dochází k velkým tepavým momentům, přičemž největší z nich dosahuje hodnoty 23,92 [Nm], což je cca 3násobek jmenovité hodnoty. Dále dosahuje stroj svého momentu zvratu o hodnotě 15,1 [Nm]. Na obrázku 4.31 jsou patrné průběhy satorového a rotorového magnetického toku, jejichž ustálené hodnoty jsou 0,94 [Wb] a 0,85 [Wb].



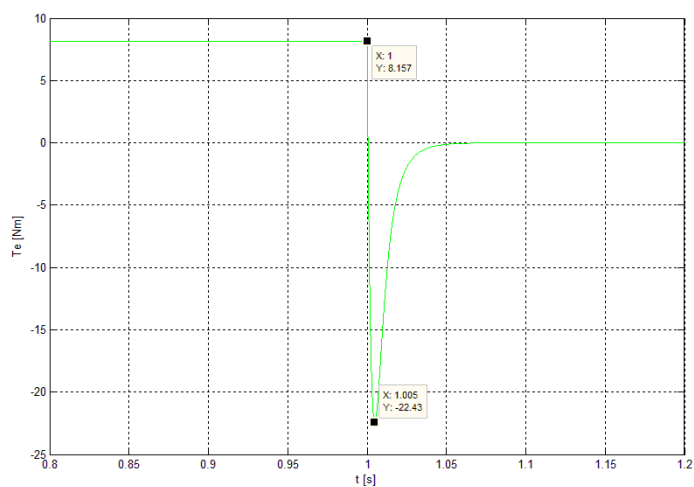
Obr. 4.32 Průběh satorových proudů při odpojení stroje od sítě při U_N



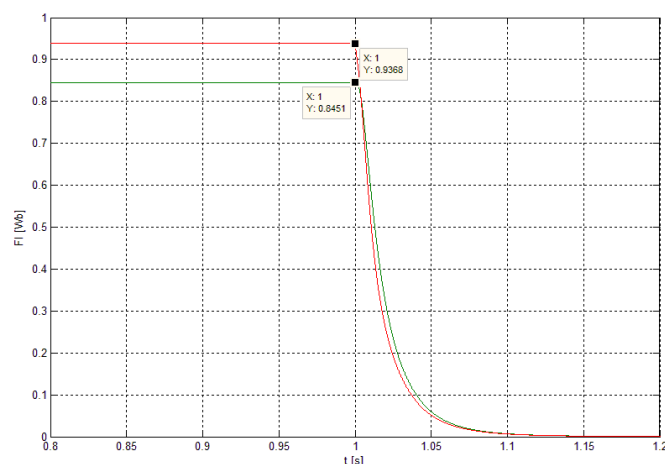
Obr. 4.33 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při U_N



Obr. 4.34 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při U_N



Obr. 4.35 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při U_N

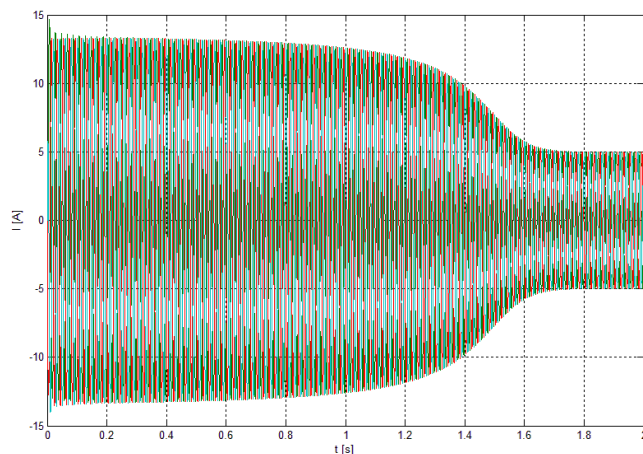


Obr. 4.36 Průběh statorového a rotorového magnetického toku při odpojení stroje od sítě při U_N

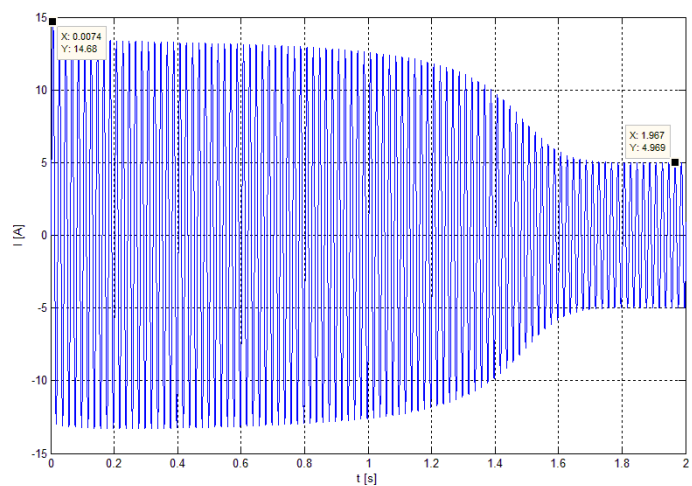
Na obrázku 4.32 jsou patrné průběhy statorových proudů při vypnutí stroje od sítě. Na obrázku 4.33 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. V okamžiku vypnutí stroje od sítě s plným (jmenovitým) zatížením dojde v čase 1,005 [s] k proudovému rázu velikosti 7,13 [A]. Z obrázku 4.34 je patrné, že rychlost poklesu otáček ze jmenovité hodnoty na nulu je velice strmá. Nulových otáček je dosaženo již za 0,3 [s]. Na obrázku 4.35 je patrné, že při odpojení stroje od sítě dosáhl momentový ráz hodnoty -22,43 [Nm]. Na obrázku 4.36 jsou patrné průběhy statorového a rotorového magnetického toku.

4.2.2 Provoz při sníženém napájecím napětí na 75% U_N

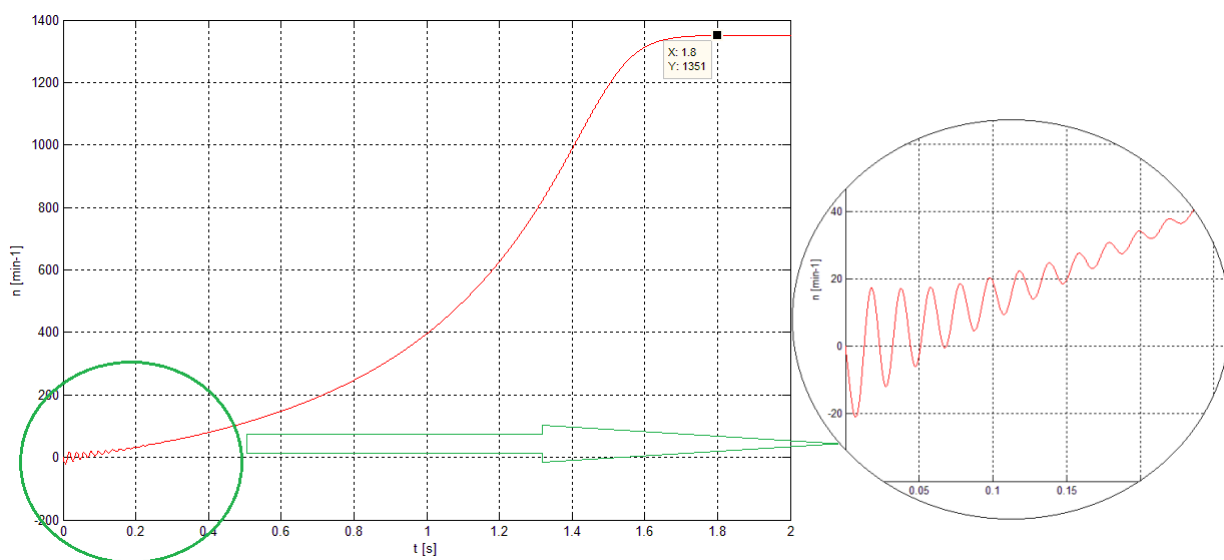
Poznámka: Simulace byla nastavena na 50% pokles napájecího napětí. Při takto sníženém napětí se však stroj se jmenovitým zatížením nerozběhl. Experimentálně jsem zjistil, že stroj je schopen rozběhu při maximálním snížení napájecího napětí právě na 75% U_N .



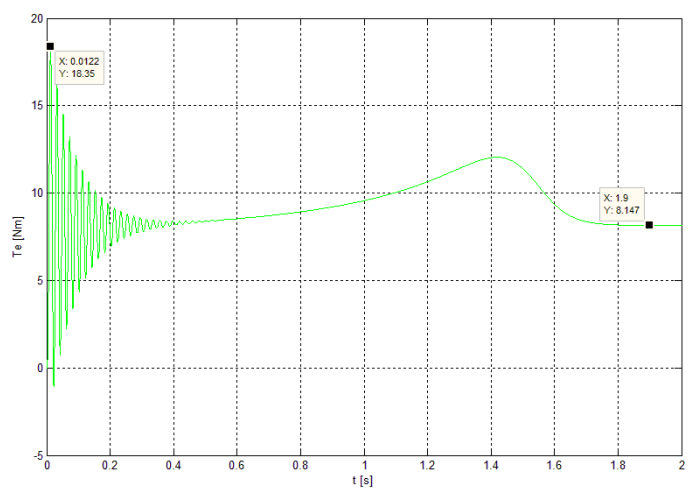
Obr. 4.37 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při 0,75 U_N



Obr. 4.38 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při $0,75U_N$

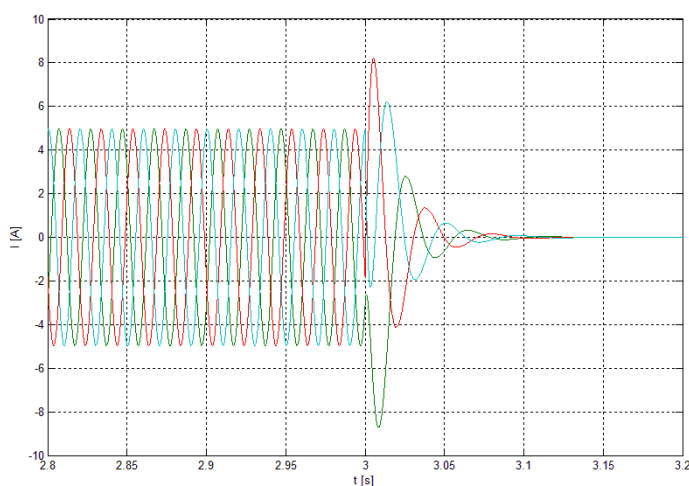


Obr. 4.39 Průběh otáček při připojení stroje na síť při $0,75U_N$

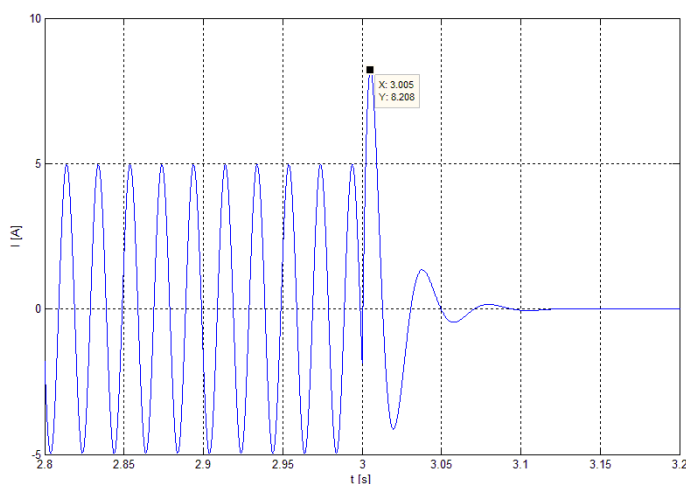


Obr. 4.40 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při $0,75U_N$

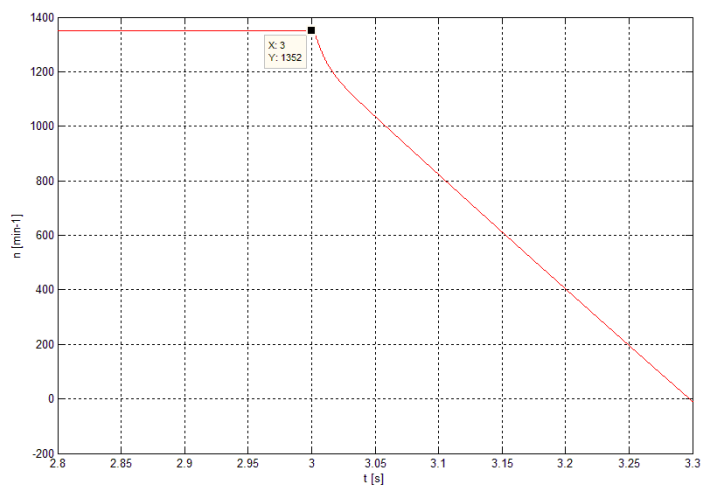
Na obrázku 4.37 jsou patrné průběhy statorových proudů při připojení stroje na síť při sníženém napětí. Na obrázku 4.38 je detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,4 [ms] záběrný proud velikosti 10,38 [A]. Můžeme konstatovat, že v čase 1,8 [s] jsou již proudové rázy ukončeny a vinutím již protéká ustálený proud 3,51 [A]. Z obrázku 4.39 je patrné, že nárůst rychlosti motoru je v počátku velmi rozkmitaný (otáčky dokonce dosahují záporných hodnot, jak je pozorovatelné na výřezu). Konstantních otáček velikosti 1351 [min⁻¹] je dosaženo v době 1,8 [s]. Na obrázku 4.40 je patrné, že při připojení stroje na síť dosáhl momentový ráz hodnoty 18,35 [Nm], což je cca 2,4násobek jmenovité hodnoty. Průběh elektromagnetického momentu je v počátku silně rozkmitaný. Poté je pozorovatelný pomalý náběh do M_{max} a ustálení na hodnotě elektromagnetického jmenovitého momentu.



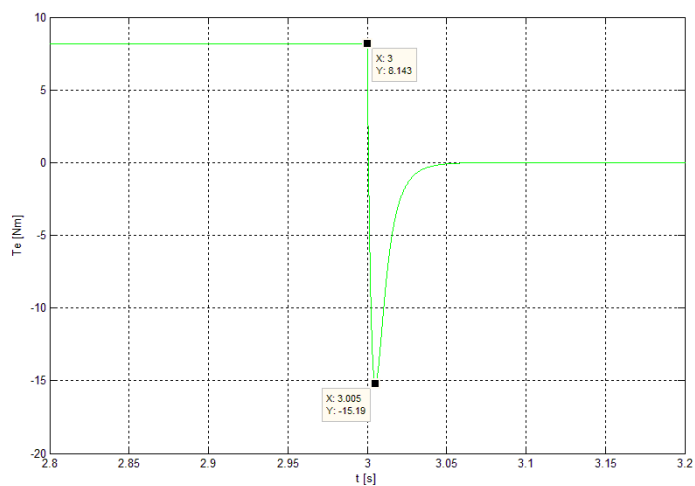
Obr. 4.41 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při $0,75U_N$



Obr. 4.42 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při $0,75U_N$



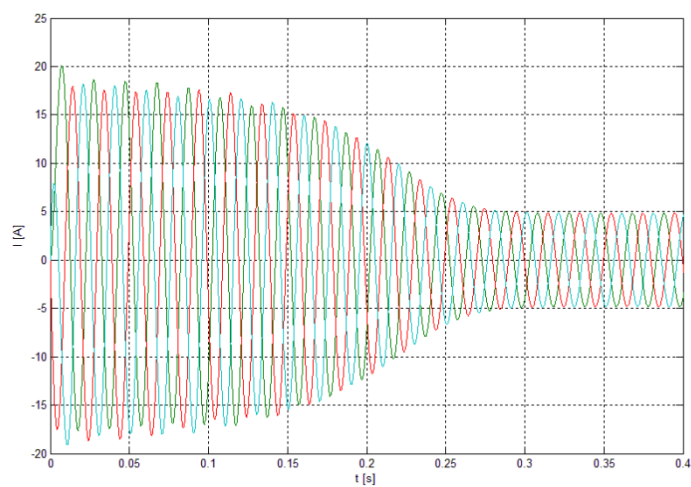
Obr. 4.43 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při $0,75U_N$



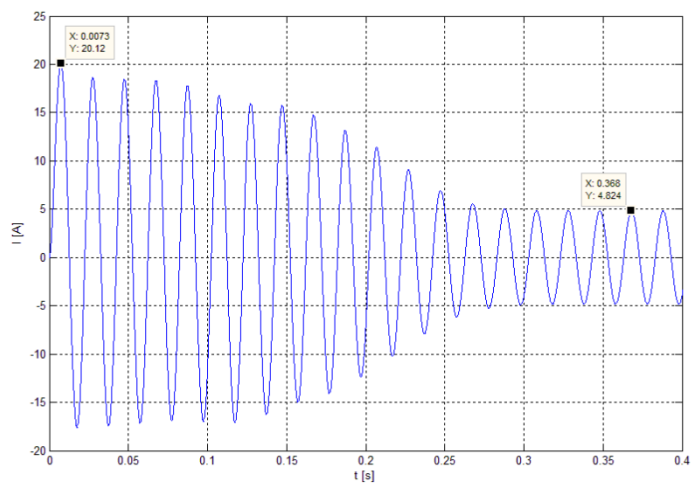
Obr. 4.44 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při $0,75U_N$

Na obrázku 4.41 jsou patrné průběhy statorových proudů při odpojení stroje od sítě při sníženém napájecím napětí. Na obrázku 4.42 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. V okamžiku odpojení dojde k proudovému rázu velikosti $5,8 \text{ [A]}$. Z obrázku 4.43 je patrné, že rychlost poklesu otáček ze jmenovité hodnoty na nulu je poměrně strmá. Nulových otáček je dosaženo již za $0,3 \text{ [s]}$. Na obrázku 4.44 je patrné, že při odpojení stroje od sítě dosáhl momentový ráz hodnoty $-15,19 \text{ [Nm]}$.

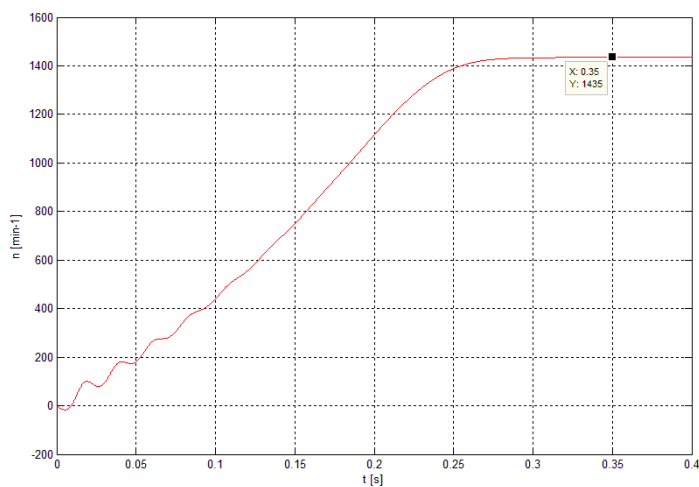
4.2.3 Provoz při zvýšeném napájecím napětí na 120% U_N



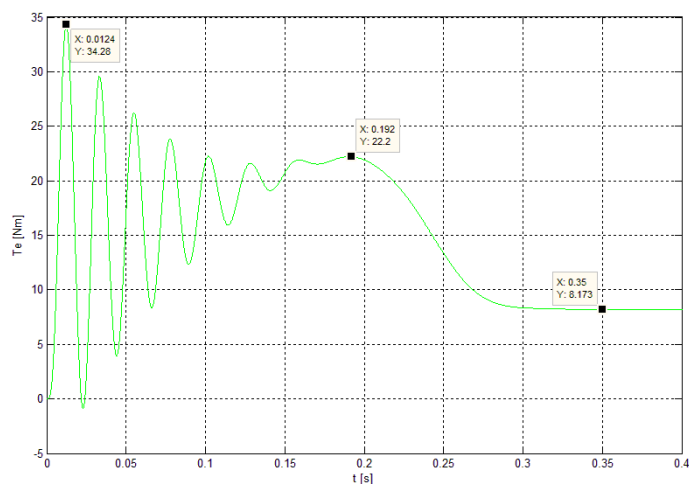
Obr. 4.45 Průběh statorových proudů při připojení stroje na síť při $1,2U_N$



Obr. 4.46 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

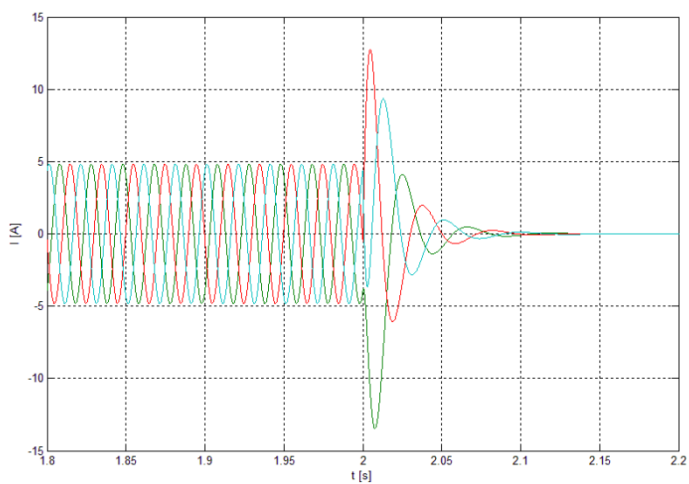


Obr. 4.47 Průběh otáček při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

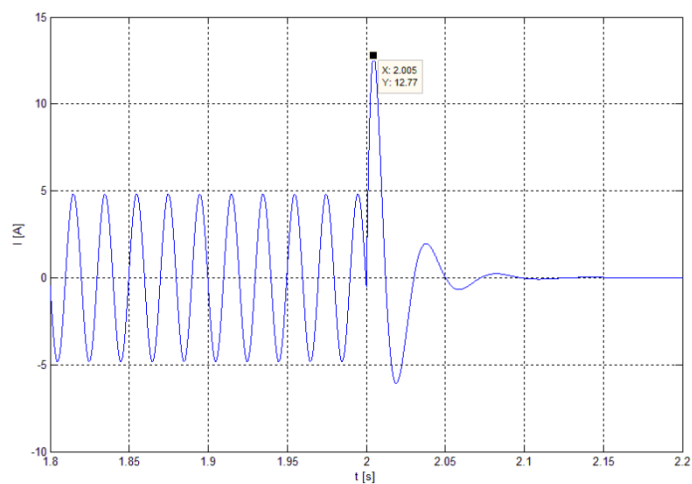


Obr. 4.48 Průběh elektromagnetického momentu při připojení stroje na síť při $1,2U_N$

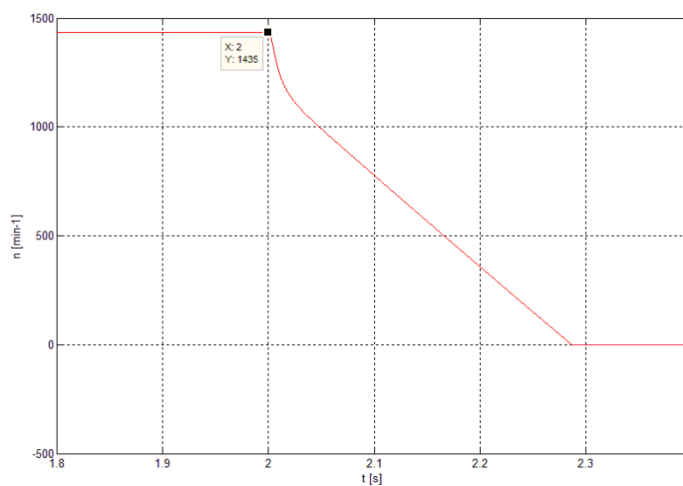
Na obrázku 4.45 jsou patrné průběhy statorových proudů při zapnutí stroje na síť při zvýšeném napájecím napětí. Na obrázku 4.46 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při zapnutí dosahuje v čase 7,3 [ms] záběrný proud velikosti 14,23 [A]. Můžeme konstatovat, že v čase 0,3 [s] jsou již proudové rázy ukončeny a vinutím již protéká ustálený proud 3,41 [A]. Z obrázku 4.47 je patrné, že nárůst rychlosti motoru je hladký (s počátečním záklmitem do záporné hodnoty) až do konstantních otáček 1435 [min⁻¹]. Na obrázku 4.48 je patrné, že při připojení stroje na síť dosáhl počáteční momentový ráz hodnoty 34,28 [Nm].



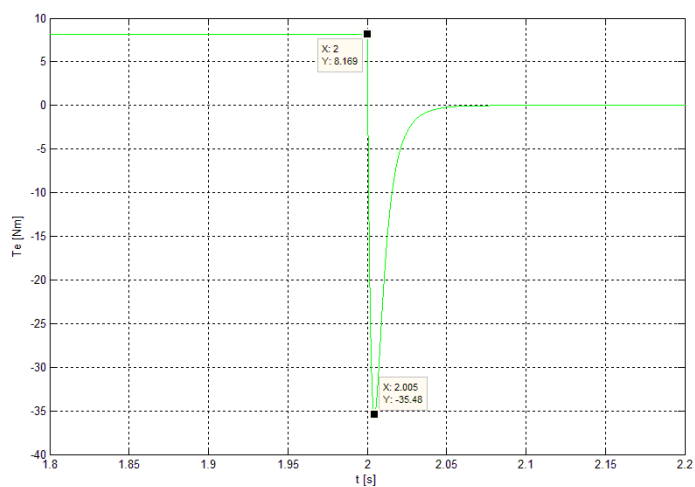
Obr. 4.49 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.50 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.51 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$



Obr. 4.52 Průběh elektromagnetického momentu při odpojení stroje od sítě při $1,2U_N$

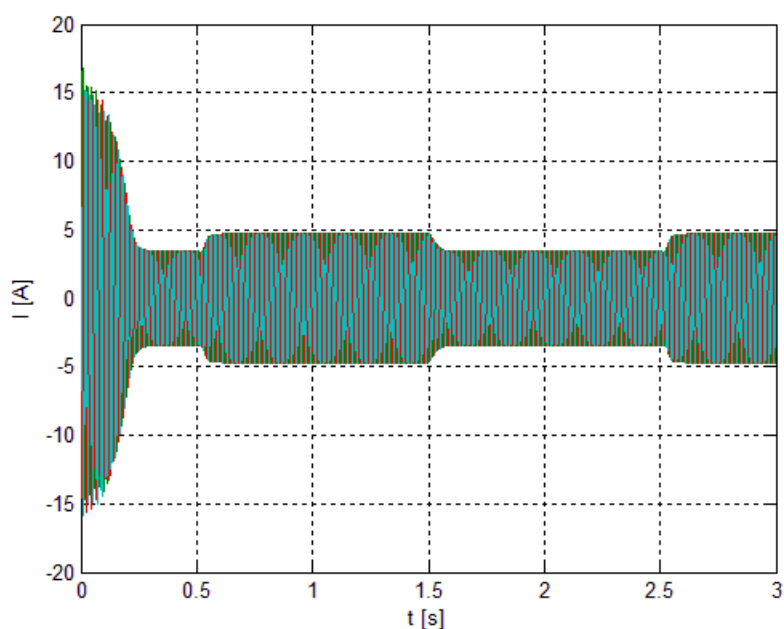
Na obrázku 4.49 jsou patrné průběhy statorových proudů při vypnutí stroje od sítě při zvýšeném napájecím napětí. Na obrázku 4.50 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Při vypnutí stroje dosahuje v čase 2,004 [s] proudový ráz velikosti 9,03 [A]. Z obrázku 4.51 je patrné, že pokles otáček motoru na nulu je hladký a rychlý. Za dobu 280 [ms] od chvíle vypnutí dosahuje stroj již skoro nulových otáček. Na obrázku 4.52 je patrné, že při odpojení stroje od sítě dosáhl momentový ráz hodnoty -35,48 [Nm].

4.3 Asynchronní motor v přerušovaném zatížení

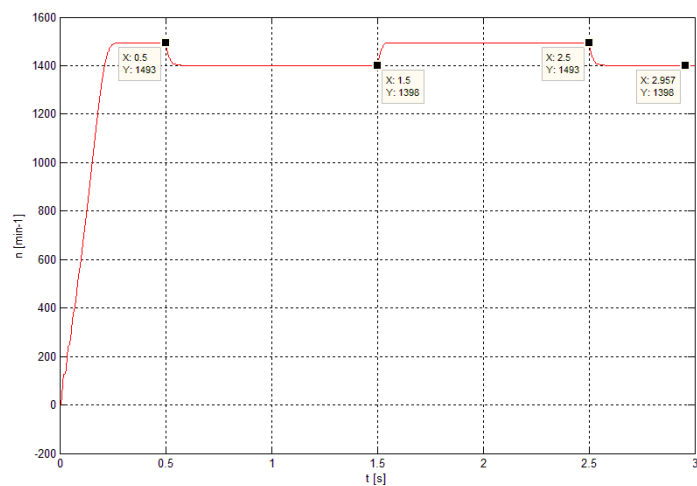
Nastavení modelu:

Asynchronní elektromotor je spuštěn ve stavu naprázdno, v době 0,5 [s] je motor zatížen jmenovitým momentem 7,72 [Nm], a to až do doby 1,5 [s], kdy je odlehčen opět do stavu naprázdno, aby byl opět v čase 2,5 [s] zatížen jmenovitým momentem.

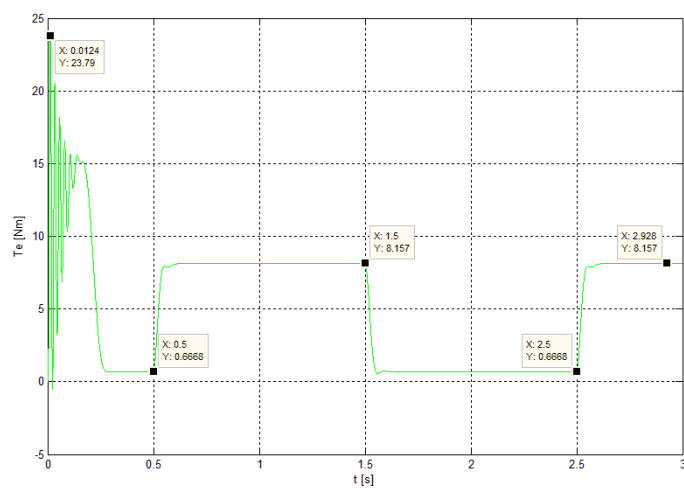
Charakteristiky:



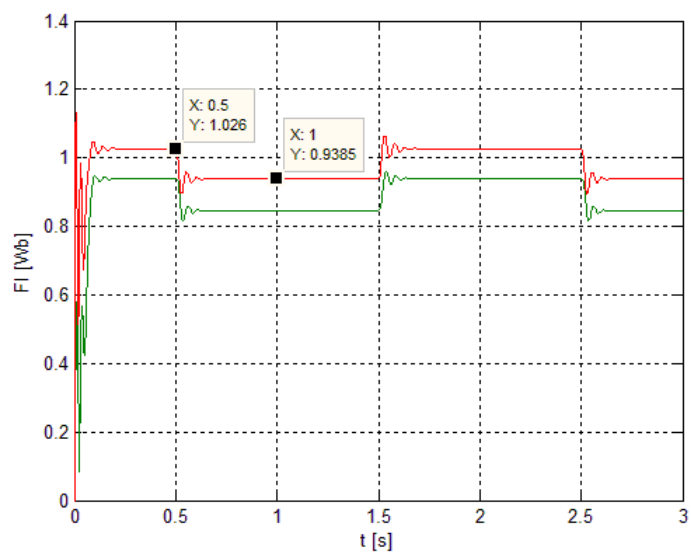
Obr. 4.53 Průběh statorových proudů při přerušovaném zatěžování stroje



Obr. 4.54 Průběh otáček stroje při přerušovaném zatěžování stroje



Obr. 4.55 Průběh elektromagnetického momentu při přerušovaném zatěžování stroje



Obr. 4.56 Průběh statorového a rotorového magnetického toku při přerušovaném zatěžování stroje

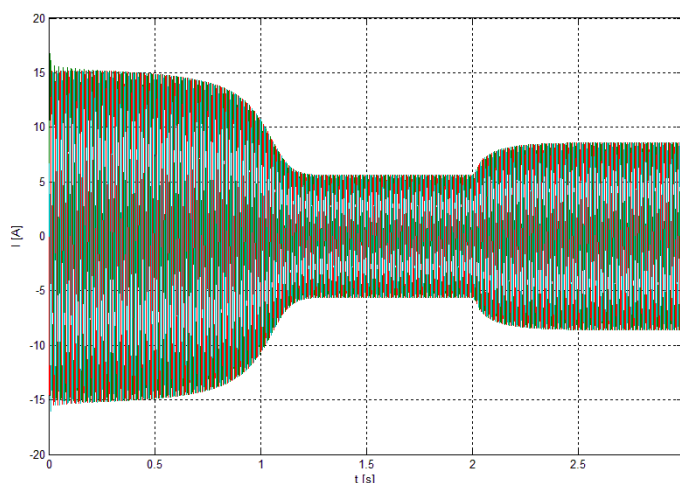
Na obrázku 4.53 jsou patrné průběhy statorových proudů při přerušovaném zatížení. Mezi jednotlivými přechody v zatížení nejsou pozorovatelné proudové rázy. Na obrázku 4.54 je vynesena charakteristika otáček stroje a na obrázku 5.45 charakteristika elektromagnetického momentu. Při připojení stroje na síť dosáhl momentový ráz hodnoty 23,1 [Nm], což je cca 3násobek jmenovité hodnoty. Z obr. 4.54 a 4.55 je dále pozorovatelné, že jednotlivé přechody z provozu naprázdno do zatížení jsou hladké a nejsou provázeny momentovými záškuby nebo ustalováním otáček. Na obrázku 4.6 jsou patrné průběhy statorového a rotorového magnetického toku, jejichž ustálené hodnoty jsou 1,026 [Wb] a 0,939 [Wb]. U magnetických toků naopak záškuby mezi jednotlivými přechody pozorovatelné jsou.

4.4 Asynchronní motor v přetížení

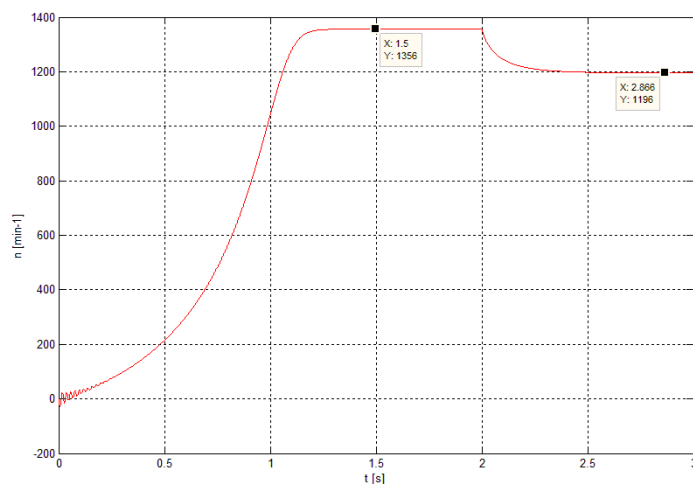
Nastavení modelu:

Asynchronní elektromotor je spuštěn s momentem zátěže 10 [Nm], který je větší než moment jmenovitý, avšak stále je v intervalu poměrného záběrného momentu. V době 2 [s] dojde k zatížení motoru momentem 14,6 [Nm], který je opět větší než jmenovitý moment, ale stále v intervalu poměrného momentu zvratu.

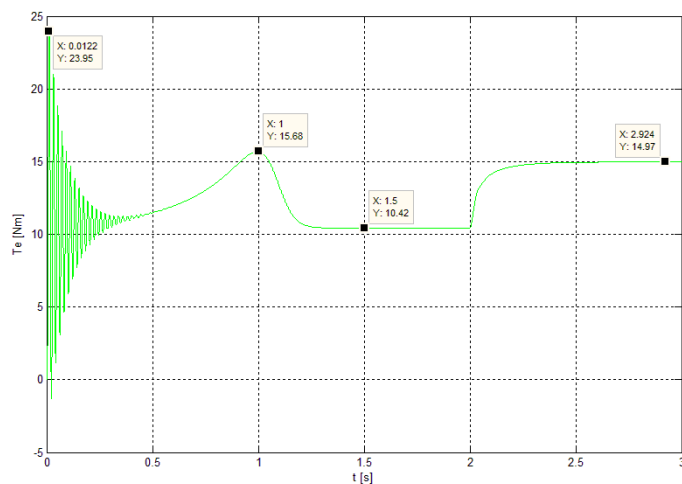
Charakteristiky:



Obr. 4.57 Průběh statorových proudů při přetížení stroje



Obr. 4.58 Průběh otáček při přetížení stroje



Obr. 4.59 Průběh elektromagnetického momentu při přetížení stroje

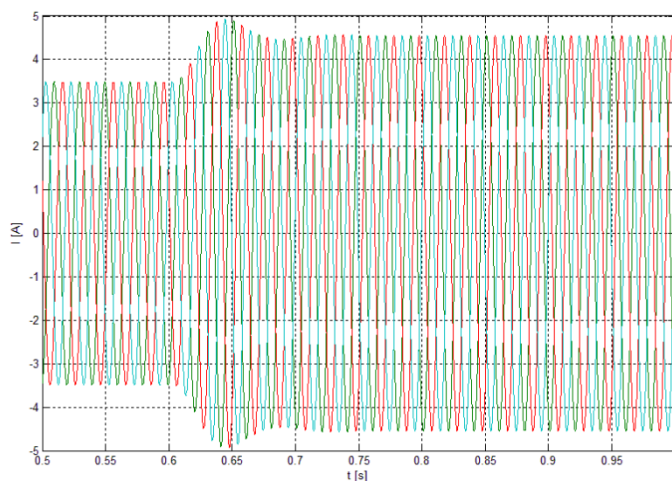
Na obrázku 4.57 jsou patrné průběhy satorových proudů při momentovém přetěžování stroje. Na obrázku 4.58 je pozorovatelné, že rozběh motoru je doprovázen počátečními zákmity rychlosti a samotný rozběh trvá 1,25 [s]. Poté stroj dosahuje konstantní hodnoty otáček 1356 [min-1]. V okamžiku zatížení stroje momentem 14,6 [Nm] dojde k rychlému a hladkému zpomalení stroje na otáčky 1196 [min-1]. Na obrázku 4.59 je patrné, že při připojení stroje na síť dosáhl momentový ráz hodnoty 23,95 [Nm]. V čase 1 [s] dosáhl stroj svého elektromagnetického momentu zvratu velikosti 15,68 [Nm]. Následné přetížení již žádnými zákmity elektromagnetického momentu doprovázeno není.

4.5 Přechod asynchronního stroje z motorického do generátorického režimu

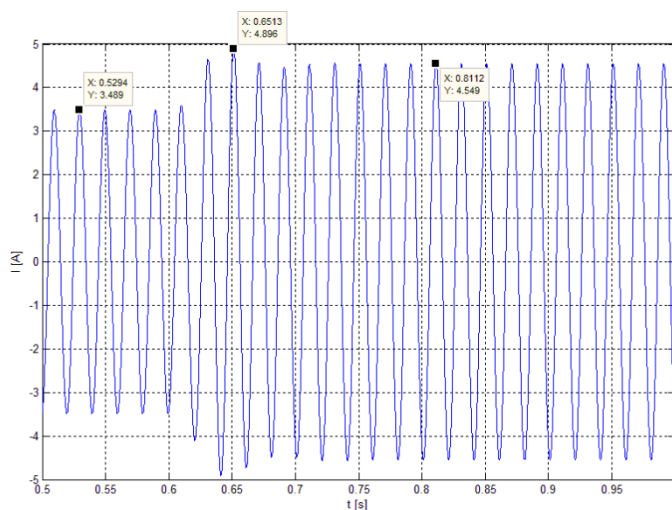
Nastavení modelu:

Asynchronní stroj je spuštěn v motorickém režimu naprázdno. V čase 0,6 [s] začne na hřídel stroje ve směru otáčení působit vnější moment $-7,72$ [Nm], který způsobí zvýšení otáček stroje do nad-synchronních, čímž stroj přejde do generátorického režimu. V tomto modelu jsou sledovány i rotorové proudy.

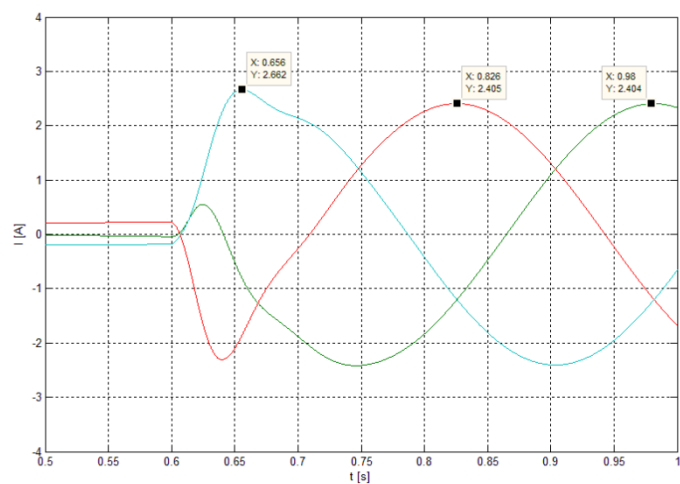
Charakteristiky:



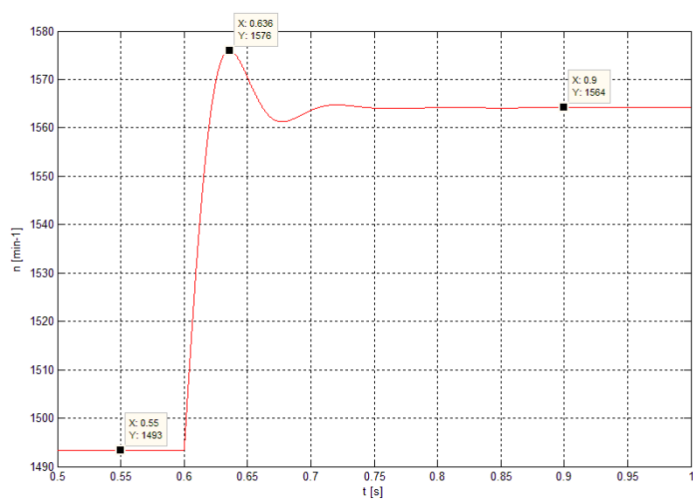
Obr. 4.60 Průběh statorových proudů při přechodu motoru do generátorického režimu



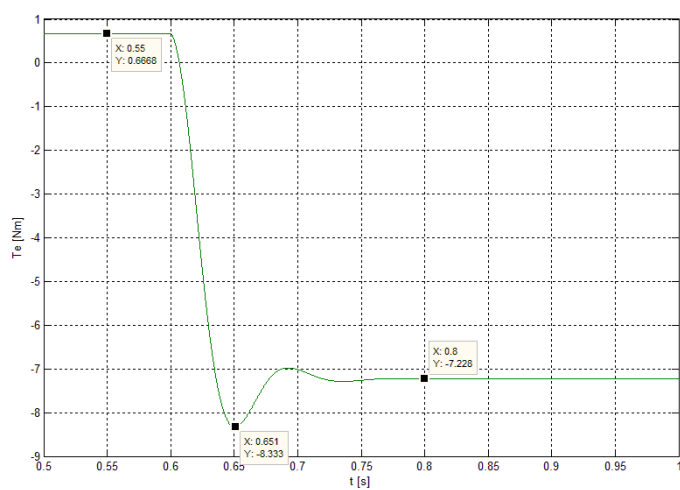
Obr. 4.61 Detailní vykreslené jedné fáze statorového proudu při přechodu motoru do generátorického režimu



Obr. 4.62 Průběh rotorových proudů při přechodu motoru do generátorického režimu



Obr. 4.63 Průběh otáček při přechodu motoru do generátorického režimu



Obr. 4.64 Průběh elektromagnetického momentu při přechodu motoru do generátorického režimu

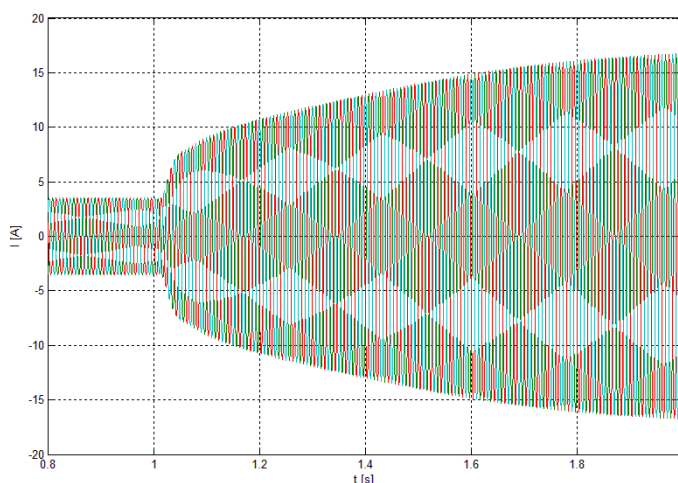
Na obrázku 4.60 jsou patrné průběhy statorových proudů při přechodu elektromotoru do režimu generátoru. Na obrázku 4.61 je pak detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. V okamžiku působení momentu začíná růst statorový proud, přičemž proudové špičky 3,46 [A] dosahuje stroj v čase 0,65 [s]. Poté dochází v čase 0,75 [s] k ustálení statorového proudu na hodnotě 3,22 [A]. Z obrázku 4.62 je patrné, že první průběhy rotorového proudu jsou v rámci první periody od okamžiku přechodu do generátoru zdeformovány. Z obrázku 4.63 je patrné, že při přechodu stroje do generátorického režimu vyvine stroj rychlost 1576 [min⁻¹] a v čase 0,75 [s] dojde k ustálení otáček na hodnotě 1564 [min⁻¹]. Z grafu 4.64 lze vypožorovat, že v okamžiku přechodu dochází k momentovému rázu o hodnotě -8,33 [Nm].

4.6 Přechod asynchronního stroje z motorického režimu do režimu brzdy

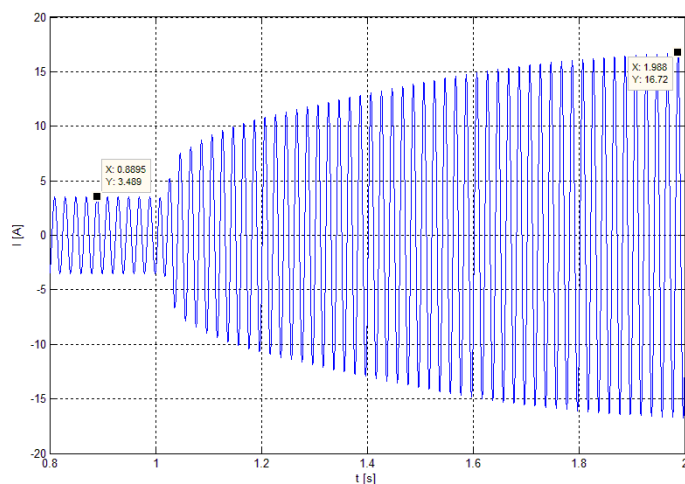
Nastavení modelu:

Asynchronní stroj je spuštěn v motorickém režimu ve stavu naprázdno. V době 1 [s] začne proti směru točení hřídele rotoru (magnetickému točivému poli statoru) působit vnější moment 18 [Nm].

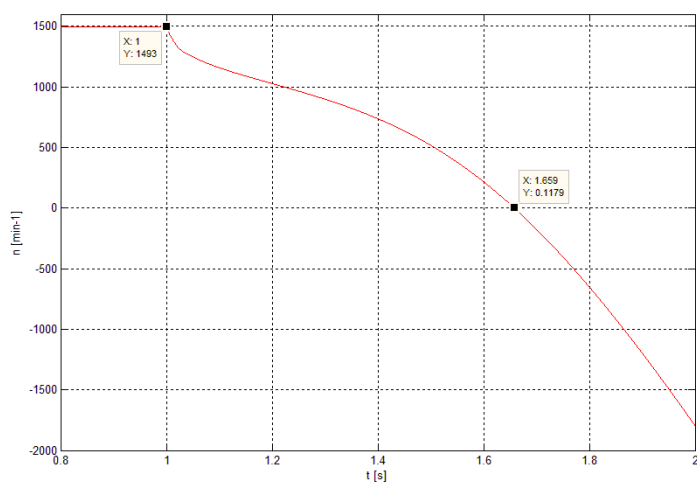
Charakteristiky:



Obr. 4.65 Průběh statorových proudů při přechodu motoru do režimu brzdy



Obr. 4.66 Detailní vykreslení jedné fáze statorového proudu při přechodu motoru do režimu brzdy



Obr. 4.67 Průběh otáček při přechodu motoru do režimu brzdy

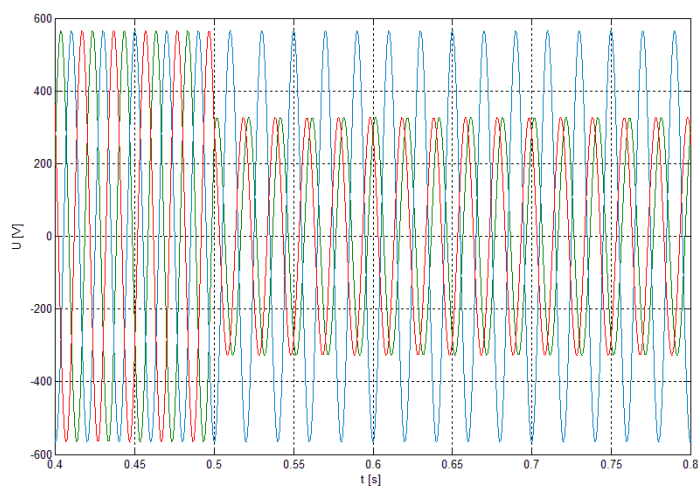
Na obrázku 4.65 jsou patrné průběhy statorových proudů při přechodu elektromotoru do režimu brzdy. Na obrázku 4.66 detailně vynesena charakteristika proudu jedné fáze. Od okamžiku působení protimomentu začíná růst statorový proud, kdy na konci simulace dosahuje hodnoty 11,82 [A]. Z obrázku 4.67 je patrné, že za dobu 1,7 [s] je dosaženo nulových otáček. Protože nedošlo v čase 0 [s] k vypnutí, začal se rotor stroje točit opačným směrem.

4.7 Asynchronní motor při nesymetrickém napájení

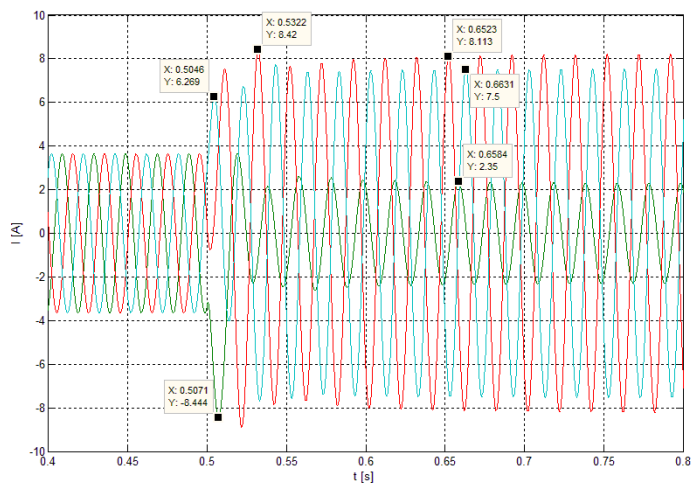
Nastavení modelu:

Asynchronní elektromotor je spuštěn s momentem zátěže 3 [Nm]. V čase 0,5 [s] je nasimulováno odpojení jedné fáze napájecí elektrické sítě. V tomto modelu jsou sledovány i rotorové proudy.

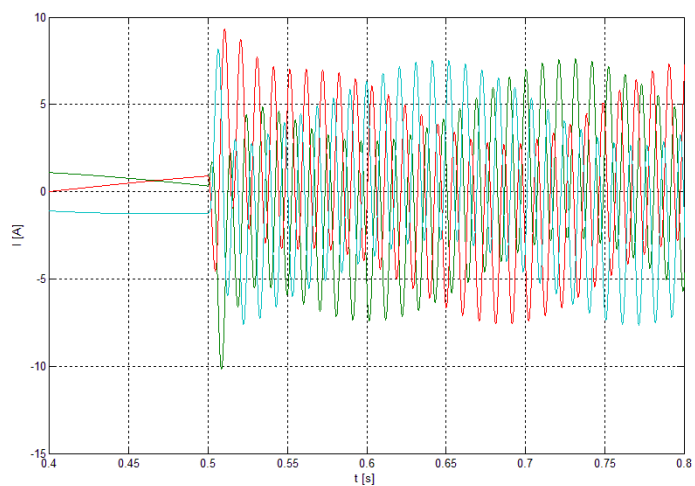
Charakteristiky:



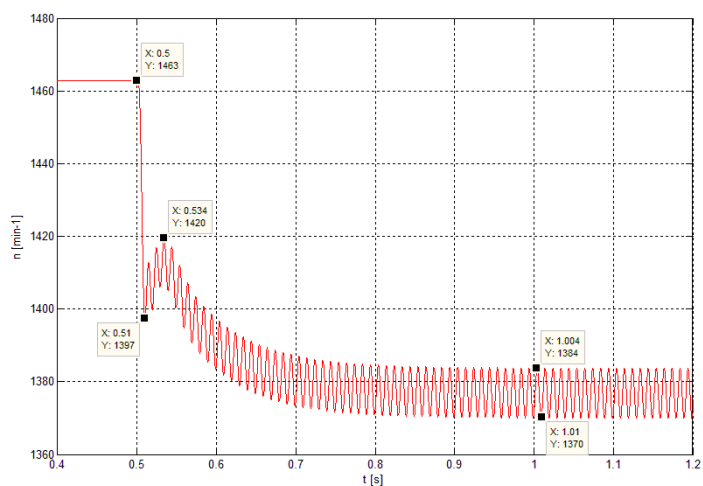
Obr. 4.68 Průběh napětí na svorkách stroje při vzniku nesymetrie v napájení



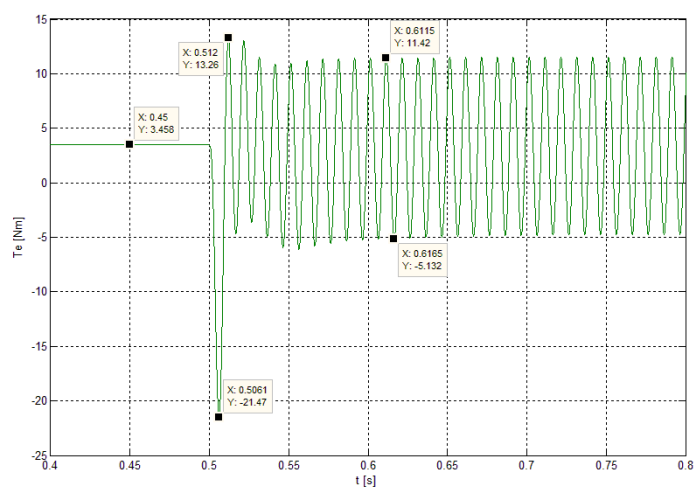
Obr. 4.69 Průběh statorových proudů stroje při vzniku nesymetrie v napájení



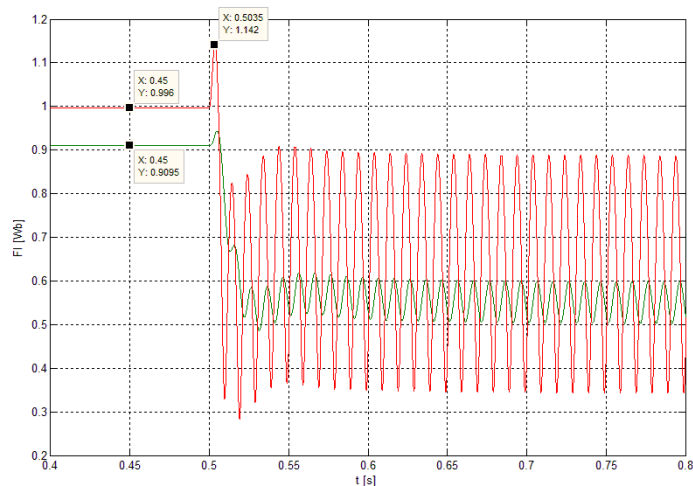
Obr. 4.70 Průběh rotorových proudů stroje při vzniku nesymetrie v napájení



Obr. 4.71 Průběh otáček stroje při vzniku nesymetrie v napájení



Obr. 4.72 Průběh elektromagnetického momentu stroje při vzniku nesymetrie v napájení



Obr. 4.73 Průběh statorového a rotorového magnetického toku stroje při vzniku nesymetrie v napájení

Na obr. 4.68 jsou průběhy statorového napětí při odpojení jedné fáze. V tomto okamžiku jsou napětí v nesymetrii. Z obr. 4.69 je patrné, že při vzniku nesymetrie došlo k proudovému zákmitu ve fázi, která byla vypojena. Poté došlo k ustálení na hodnotě 1,66 [A]. Ve zbývajících dvou fázích byl nárůst proudů postupný, bez proudových zákmitů. Na obr. 4.70 je průběh rotorových proudů. Z grafu 4.71 je patrné, že po vypojení fáze dochází ke snížení otáček. Po celou dobu nejsou otáčky konstantní. Z průběhů 4.72 a 4.73 je možné zpozorovat, že chod motoru není stabilní.

4.8 Vyhodnocení realizovaných simulací

4.8.1 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení elektromotoru naprázdno

Pro vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení elektromotoru bez zatížení (kap. 4.1) je možné sestavit následující tabulku, v které jsou porovnány hodnoty získané z průběhů:

Tab. 4.1 Porovnání výsledků simulace při provozu stroje bez zátěže

	PŘIPOJENÍ							ODPOJENÍ		
	I_K	t_a	I_0	Te_p	Te_0	Te_{max}	n	I_{vyp}	t_b	Te_{vyp}
U_N	11,83	0,26	2,53	23,79	0,7	15	1493	8,28	6,76	-28,92
$0,5U_N$	5,92	1,1	1,26	6	0,67	3,94	1471	4,1	7	-6,9
$1,2U_N$	14,18	0,2	2,96	34,09	0,69	21,52	1495	10,02	6,5	-45,95

Posouzení z hlediska záběrného proudu I_K :

Z tab. 4.1 lze vypožorovat, že při napájení $0,5U_N$ poklesl rovněž záběrný proud I_K na polovinu. Při napájení $1,2U_N$ pak vinutím protéká záběrný proud o 20% větší.

Posouzení z hlediska doby rozběhu t_a :

Doba rozběhu elektromotoru t_a se při napájení $0,5U_N$ prodloužila 4 krát oproti rozběhu při U_N . Při napájení $1,2U_N$ se však doba rozběhu zkrátila jen nepatrně oproti t_a při jmenovitém napájení.

Posouzení z hlediska ustálené hodnoty proudu naprázdno I_0 :

Hodnoty ustálených proudů I_0 jsou rovněž v cca stejném poměru, v jakém se měnila napájecí napětí, tedy 50[%] a 120[%] oproti jmenovitému napájení.

Posouzení z hlediska max. přechodného elektromagnetického momentu T_{ep} :

Ve vztahu 3.21 jsme určili krajní velikost přechodného momentu, který může stroj vyvinout při plném zatížení a při současném zapnutí všech fází na hodnotu 28,91 [Nm]. Při stavu naprázdno bylo většího než tohoto krajního zákmitu dosaženo pouze při $1,2U_N$. Při $0,5U_N$ byl prvotní ráz elektromagnetického momentu cca 4 krát menší než při napájení U_N . Tím je rovněž potvrzen poznatek, že moment se snižuje s kvadrátem napětí. Při $1,2U_N$ je pak tento ráz 1,18krát větší.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentu naprázdno T_{e0} :

Elektromagnetický moment T_e je v ustálení u všech způsobech napájení přibližně stejný a slouží ke krytí vlastních ztrát.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentu zvratu $T_{e_{max}}$:

Z katalogu je možné určit velikost momentu zvratu na hodnotu 14,67 [Nm]. Při jmenovitém napájení dosáhl stroj momentu zvratu 15 [Nm]. Při $0,5U_N$ poklesl moment zvratu na hodnotu 3,94 [Nm]. Při $1,2U_N$ došlo k zvýšení momentu zvratu na hodnotu 21,52 [Nm]. Výsledky korespondují s poznatkem, že velikost momentu se mění s kvadrátem napětí.

Posouzení z hlediska rychlosti stroje n :

Ze simulací dále vyplynulo, že velikost napájecího napětí mírně ovlivňuje velikost otáček ve stavu naprázdno.

Posouzení z hlediska proudového nárazu při odpojení I_{vyp} :

Proudové rázy v okamžiku vypnutí byly ve všech případech menší než I_K , přesto musíme konstatovat, že velikost proudu při odpojení stroje od sítě není oproti jmenovité hodnotě zanedbatelná. Je pozorovatelné, že velikost napětí (a tedy i proudu) nemá při odpojování stroje od sítě vliv na dobu trvání proudových zákmitů. Ve všech případech došlo k jejich utlumení po 100 [ms].

Posouzení z hlediska doby doběhu stroje t_b :

Doba doběhu stroje t_b do klidového stavu je ve všech případech v podstatě totožná.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentový ráz při vypnutí T_{evyp} :

Za zmínku stojí zjištění, že jednotlivé momentové rázy T_{evyp} při odpojení stroje od sítě jsou větší než momentové rázy vzniklé při připojení.

4.8.2 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení zatíženého elektromotoru

Pro vyhodnocení přechodných dějů při připojení a odpojení elektromotoru s plným zatížením (kap. 4.2) je možné opět sestavit tabulku, v které jsou porovnány hodnoty získané z průběhů:

Tab. 4.2 Porovnání výsledků simulace při provozu stroje se jmenovitým zatížením

	PŘIPOJENÍ							ODPOJENÍ		
	I_K	t_a	I_N	Te_p	Te_N	Te_{max}	n	I_{vyp}	t_b	Te_{vyp}
U_N	11,85	0,6	3,32	23,92	8,16	15,1	1398	7,14	0,3	-22,43
$0,75U_N$	10,38	1,8	3,51	18,35	8,15	11,8	1351	5,8	0,3	-15,19
$1,2U_N$	14,23	0,3	3,41	34,28	8,15	22,2	1435	9,03	0,28	-35,48

Posouzení z hlediska záběrného proudu I_K :

Z následující tabulky lze vypožorovat, že při napájení $0,75U_N$ poklesl záběrný proud I_K na cca 87 [%] záběrného proudu při U_N . Z katalogových hodnot (obr. 3.1) je možné zjistit, že výrobce udává velikost I_K při jmenovitém napětí 11,38 [A]. Simulací byla získána hodnota pro jmenovité napětí $I_K = 11,85$ [A].

Posouzení z hlediska doby rozběhu t_a :

Doba rozběhu elektromotoru t_a se při napájení $0,75U_N$ prodloužila 3 krát oproti rozběhu při U_N . Při napájení $1,2U_N$ se rozběh stroje zrychlil 2 krát oproti rozběhu při U_N .

Posouzení z hlediska ustálené hodnoty jmenovitého proudu I_N :

Z katalogových hodnot (obr. 3.1) je možné zjistit, že výrobce udává velikost jmenovitého proudu $I_N = 3,25$ [A]. Simulací byla získána hodnota pro jmenovité napětí $I_N = 3,32$ [A]. Mimo jiné můžeme tedy konstatovat, že model byl nastaven správně. Drobné odchylky modelových hodnot od katalogových patrně vznikly nepřesnostmi při vyhodnocování měření naprázdno a nakrátko a zaokrouhlováním při výpočtu prvků náhradního schématu.

Posouzení z hlediska max. přechodného elektromagnetického momentu T_{ep} :

Ve vztahu 3.21 jsme určili krajní velikost přechodného momentu, který může stroj vyvinout při plném zatížení a při současném zapnutí všech fází na hodnotu 28,91 [Nm]. Můžeme tedy konstatovat, že tato hodnota nebyla při jmenovitém napájení překročena. Velikosti jednotlivých momentů rovněž odpovídají štítkovým hodnotám, ačkoliv pracujeme s elektromagnetickým momentem, jehož velikost je pochopitelně vyšší než u mechanického momentu.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentu naprázdno T_{eN} :

Elektromagnetický moment T_{eN} je v ustálení u všech způsobech napájení přibližně stejný a odpovídá jmenovitému zatížení stroje.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentu zvratu T_{emax} :

Z katalogu je možné určit velikost momentu zvratu na hodnotu 14,67 [Nm]. Při jmenovitém napájení dosáhl stroj momentu zvratu 15,1 [Nm]. Při $0,75U_N$ poklesl moment zvratu na hodnotu 11,8 [Nm]. Při $1,2U_N$ došlo k zvýšení momentu zvratu na hodnotu 22,2 [Nm]. Výsledky korespondují s poznatkem, že velikost momentu se mění s kvadrátem napětí.

Posouzení z hlediska rychlosti stroje n :

Zajímavým jevem jsou ustálené jmenovité otáčky při jmenovitém napájení – simulací bylo zjištěno, že jejich velikost je 1398 [min⁻¹], kdežto katalogová hodnota je 1360 [min⁻¹]. Tato nepřesnost mohla vzniknout zaokrouhlováním při výpočtu prvků náhradního schématu a bude provedeno ověření v kapitole měření.

Lze vyzorovat, že velikost napájecího napětí měla vliv na rychlost stroje. Pokud bychom přijali předpoklad, že pro námi zvolené poháněné zařízení není podstatná drobná

odchylka rychlosti, můžeme konstatovat, že provoz při zvýšeném napětí není výhodný, jelikož odebíráme ze sítě vyšší proud, než udává štítek stroje.

Posouzení z hlediska proudového nárazu při odpojení I_{vyp} :

Proudové rázy v okamžiku vypnutí byly ve všech případech menší než I_K , přesto musíme opět konstatovat, že velikost proudu při odpojení stroje od sítě není oproti jmenovité hodnotě zanedbatelná. Je pozorovatelné, že velikost napětí (a tedy i proudu) nemá při odpojování stroje od sítě vliv na dobu trvání proudových zákmitů. Ve všech případech došlo k jejich utlumení po 100 [ms].

Posouzení z hlediska doby doběhu stroje t_b :

Doba doběhu stroje t_b do klidového stavu je ve všech případech totožná.

Posouzení z hlediska elektromagnetického momentový ráz při vypnutí T_{evyp} :

Jednotlivé momentové rázy T_{evyp} při odpojení stroje od sítě jsou větší než momentové rázy vzniklé při připojení.

4.8.3 Porovnání přechodných dějů při provozu naprázdno a v zatížení

Nyní můžeme provést porovnání mezi zapínáním (vypínáním) stroje nezatíženého a stroje zatíženého.

Můžeme konstatovat, že došlo k prokázání známého faktu, že velikost zatěžovacího momentu nemá vliv na velikost záběrného proudu, avšak na dobu trvání rozběhu elektromotoru. Při jmenovitém zatížení se elektromotor rozbíhal 2,3krát déle oproti rozběhu naprázdno. Při napájení zvýšeným napětím je však doba rozběhu totožná pro oba případy. Pro velikosti zákmitů momentu, které vznikají při spouštění stroje, můžeme vyvodit obdobný závěr. Velikost zátěžného momentu působícího na hřídel rotoru nemá vliv na velikost momentových rázů.

K zajímavému postřehu dojdeme, porovnáme-li velikosti proudových rázů při vypnutí stroje. Pakliže stroj vypínáme ve stavu naprázdno, je vzniklý proudový náraz větší než v situaci, kdy vypínáme stroj zatížený.

Doby doběhu jsou u zatíženého stroje pochopitelně podstatně kratší než u stroje nezatíženého. Momentové zákmity jsou rovněž při vypnutí stroje nezatíženého větší oproti zatíženému stroji.

4.8.4 Vyhodnocení ostatních přechodných dějů

U asynchronního stroje v přerušovaném zatížení (kap. 4.3) nebyly na simulovaných průbězích pozorovány výraznější přechodné děje. Mezi jednotlivými přechody v zatížení nejsou pozorovatelné proudové rázy a rovněž na charakteristice otáček a elektromagnetického momentu nejsou pozorovány zákmity. U této simulace je důležité poznamenat, že je do určité míry ilustrativní, neboť pro přerušované zatížení je definována doba jednoho cyklu na 10 minut, což v tomto případě z pochopitelných důvodů nemohlo být dodrženo.

Při porovnání chování asynchronního stroje v přetížení (kap. 4.4) s ostatními provozními stavy musíme konstatovat, že samotné přetěžování není zdrojem významných přechodných dějů, které by svou mírou (velikostí a dobou trvání) převyšovaly přechodné děje vzniklé připojením, odpojením, nebo přerušováním zatížením. Jediným významným faktorem z hlediska ustálených hodnot je výrazný pokles rychlosti elektromotoru.

Při přechodu elektromotoru do generátorického režimu (4.5) došlo ke zvýšeným proudovým špičkám ve vinutí statoru. Poté došlo k ustálení a zvýšený proud můžeme chápat jako činnou složku proudu dodávaného do sítě. Okamžik přechodu není doprovázen významným proudovým rázem ani momentovým zákmitem, je pozorovatelný pouze zákmit v rychlosti stroje při přechodu do nadsynchronních otáček. Přechod do režimu brzdy (4.6) je doprovázen velkým nárůstem proudu. V samotném okamžiku brzdění nedochází k proudovým zámitům, avšak proud roste postupně a ani v době ukončení simulace jeho hodnota nebyla ustálená. Z průběhu otáček je mj. pozorovatelné, že v okamžiku zabrzdění nedošlo k odpojení stroje, a proto se stroj začal rozbíhat opačným směrem.

Takto nasimulovaný přechod do režimu brzdy je nutné považovat za ilustrativní, neboť na základě výsledků simulace můžeme konstatovat, že při obdobném způsobu provozu v praxi by došlo ke zničení elektromotoru.

Posledním nasimulovaným provozním stavem byl chod elektromotoru při nesymetrickém napájení, kdy bylo nasimulováno vypojení jedné fáze během provozu elektromotoru. S ohledem na známý fakt, že při jednofázovém napájení klesne moment elektromotoru přibližně na jednu třetinu jmenovité hodnoty, byla nastavena velikost zatěžovacího momentu na 3 [Nm]. Z průběhů napětí (obr. 4.68) je patrné, že po rozrušení symetrie došlo i k narušení souměrnosti statorových proudů (4.69). Přechod ze souměrného stavu do okamžiku, kdy jsou v jednotlivých fázích různé velikosti proudu a fázový posuv mezi fázemi je nesymetrický, není doprovázen výraznými přechodnými jevy. Je pouze pozorován proudový zákmit ve fázi statoru, v které bylo přerušeno napájení. Z grafu 4.71 je patrné, že po vypojení fáze dochází ke snížení otáček. Po celou dobu nejsou otáčky konstantní. Z průběhů

4.72 a 4.73 je možné zpozorovat, že chod motoru není stabilní. Lze tedy konstatovat, že v okamžiku vzniku nesymetrie v napájecí síti nedochází v elektromotoru k významným přechodným dějům, avšak z provedené simulace je očividné, že pro stroj jsou nebezpečné ustálené hodnoty elektrického proudu. Pakliže by elektromotor byl vůbec schopen provozu, pak by při neodpojení od sítě tento provoz vedl ke spálení vinutí.

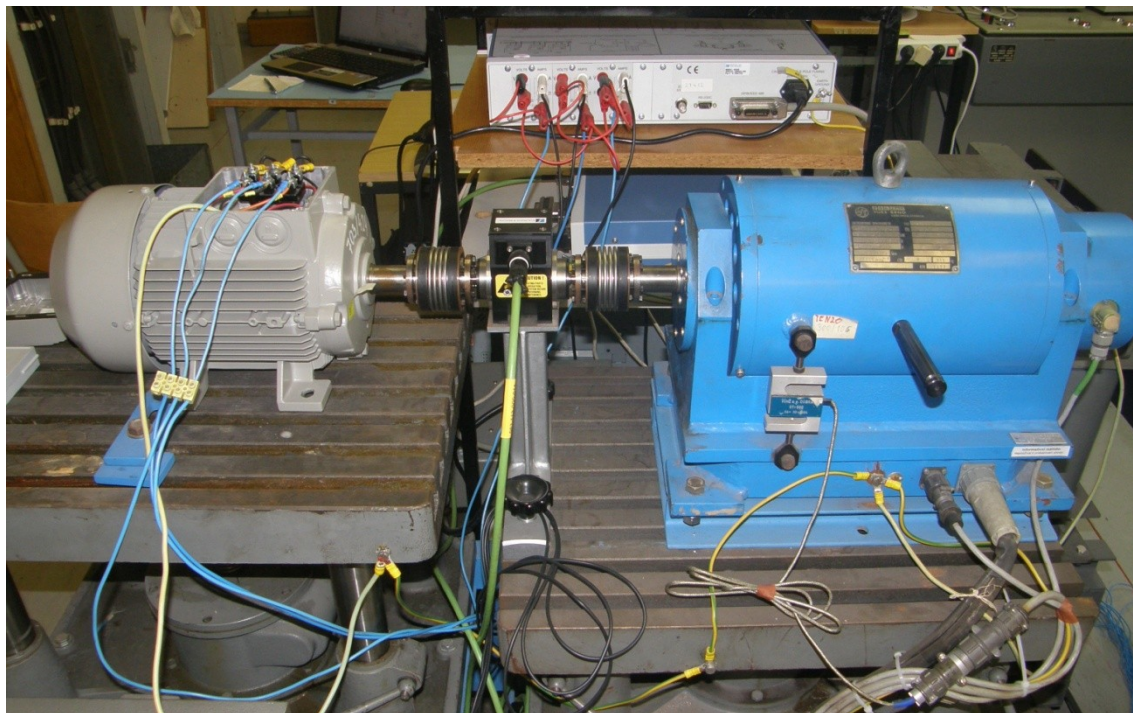
4.8.5 Závěrečné konstatování

Porovnáním všech přechodných dějů, které jsme v rámci simulování posuzovali, můžeme vyvodit závěr, že nejvýraznější přechodné děje jsou spjaty s připojením a odpojením stroje od sítě. Z hlediska elektrického namáhání vinutí je důležité posouzení velikosti proudového rázu a doby jeho trvání. Zde lze konstatovat, že charakter poháněného zařízení (především co do velikosti zátěžného momentu) nemá vliv na velikost proudových rázů, avšak má podstatný vliv na dobu trvání tohoto proudového namáhání, tedy na dobu rozběhu. Jelikož nám jde především o rychlost a plynulost průběhu přechodného děje, je dle získaných hodnot evidentní, že napájení jmenovitým napětím je nejoptimálnější pro rozběh. Při zvýšeném napětí je sice rozběh stroje rychlejší, avšak vinutí je namáháno vyšším proudem. U napájení nižším napětím je sice velikost proudových rázů menší, zato se však prodloužila doba rozběhu (doba, po kterou proud protéká vinutím a namáhá jej) a klesla velikost záběrného momentu.

V rámci porovnávání nasimulovaných hodnot s hodnotami katalogovými docházelo k drobným odchylkám. Odchylky byly způsobeny nepřesnostmi při měření hodnot nutných pro následný výpočet prvků náhradního schématu a rovněž zaokrouhlováním při výpočtech.

5. MĚŘENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI

Měření bylo realizováno na totožném asynchronním stroji, který byl použit pro modelování a simulaci (Obr. 3.1). Při všech měřeních bylo uvažováno zapojení v YY, tedy v rychlosti 1360 [min⁻¹]. Zkoumaný asynchronní stroj je trvale spojen s asynchronním dynamometrem (Obr. 5.1). Celé soustrojí je snímáno pomocí čidla Magtrol, které je přes měřicí terminály propojeno s PC sestavou.



Obr. 5.1 Pracoviště pro měření přechodných dějů v asynchronním stroji

Použité přístroje:

Asynchronní dynamometr ASD 5000 (v. čís. 125153), VÚES Brno, (5kW/260V/15,3A/2900 min⁻¹)

Čidlo MAGTROL TMB 308/411

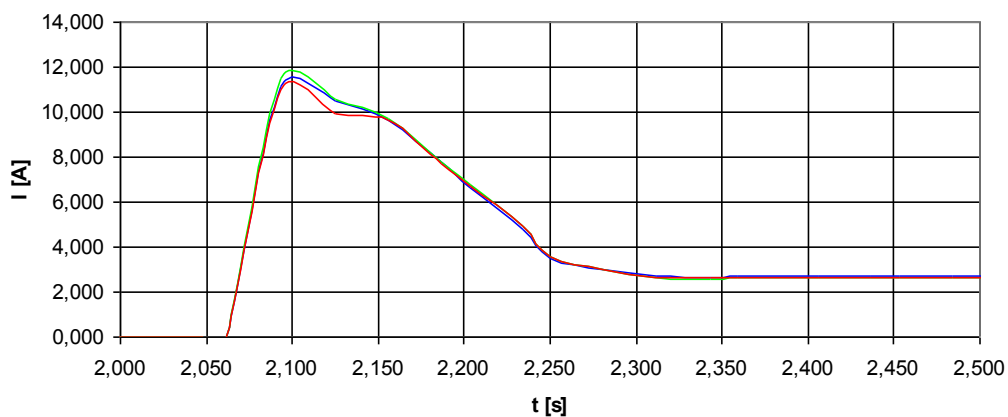
PC se software TORQUE 1.0

Osciloskop Fluke Scopemeter Color 199C, 200MHz, 2GS/s

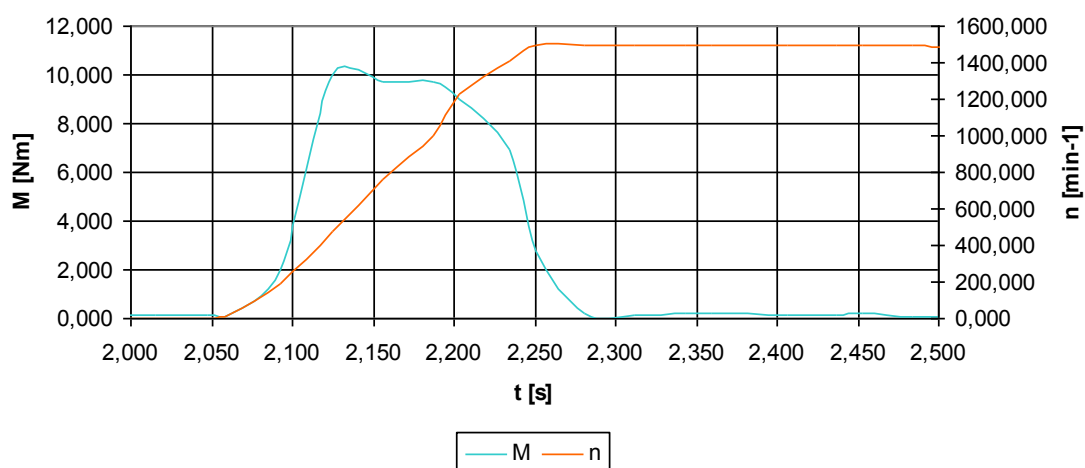
Cívka pro měření rozptylového magnetického pole (10000 závitů, vnější/vnitřní průměr 70/20mm, délka 20mm)

5.1 Připojení a odpojení asynchronního motoru bez zátěže

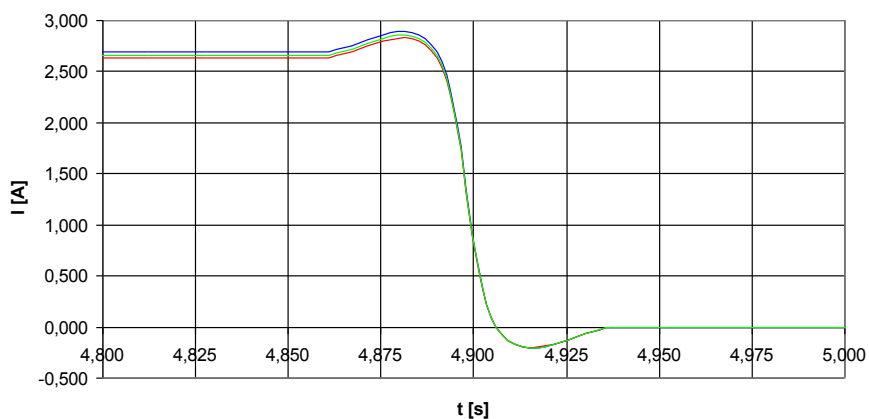
5.1.1 Asynchronní motor napájený ze sítě při jmenovitém napětí $U_N = 400\text{V}$



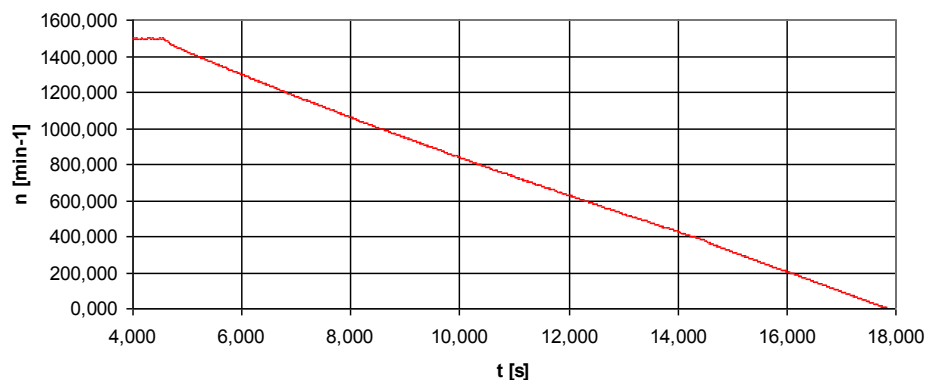
Obr. 5.2 Průběh statorových proudů při připojení stroje k síti při U_N



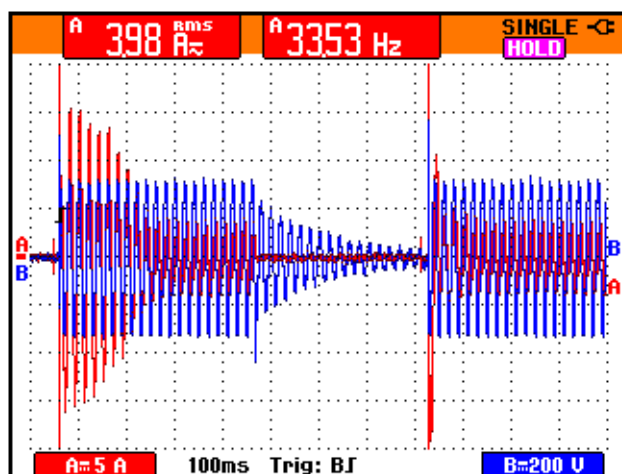
Obr. 5.3 Průběh momentu a otáček při připojení stroje k síti při U_N



Obr. 5.4 Průběh statorových proudů při odpojení stroje od sítě při U_N



Obr. 5.5 Průběh otáček při odpojení stroje od sítě při U_N



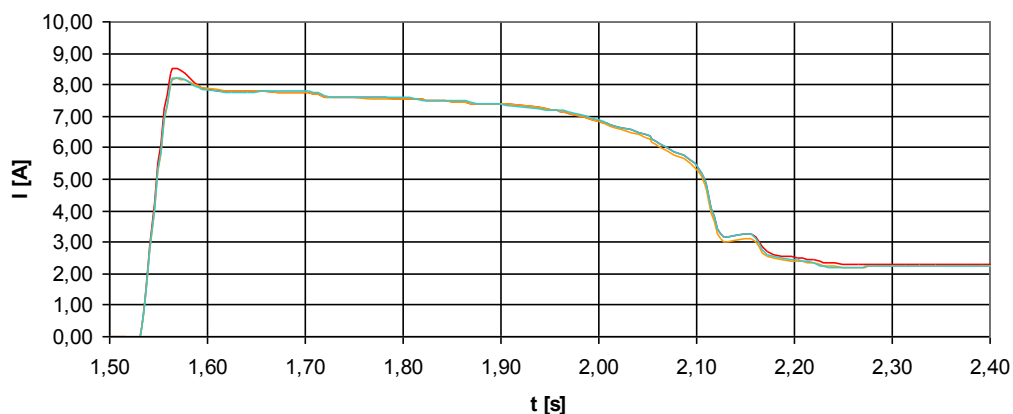
Obr. 5.6 Záznam osciloskopu při připojení a odpojení stroje od sítě (s opětovným zapnutím)

K zapnutí elektromotoru k síti došlo v čase 2,062 [s]. Na obr. 5.2 jsou průběhy statorového proudu. Je patrné, že v čase 2,1 [s] prochází vinutím záběrný proud velikosti 11,3 [A]. V čase 2,3 [s] již došlo k ukončení rozběhu a vinutím protéká ustálený proud naprázdno velikosti 2,67 [A]. Z obr. 5.3 je pozorovatelné, že rozběh motoru je hladký a trvá 0,24 [s]. Rychlost elektromotoru je v ustálení 1497 [min-1]. Maximální moment dosahuje v čase 2,13 [s] velikosti 10,2 [Nm]. Poté došlo k postupnému klesání momentu, kdy v čase 0,3 [s] již motor vyvíjí moment pouze ke krytí vlastních ztrát. Jeho velikost je 0,2 [Nm]. Rozběh stroje byl snímán rovněž osciloskopem (obr. 5.6). Je viditelné, že sejmutý záběrný proud dosahuje velikosti 14,14 [A]. Důvody, proč se velikosti záběrného proudu snímané měřicí soupravou a osciloskopem liší, jsou vysvětleny ve vyhodnocení v 6. kapitole.

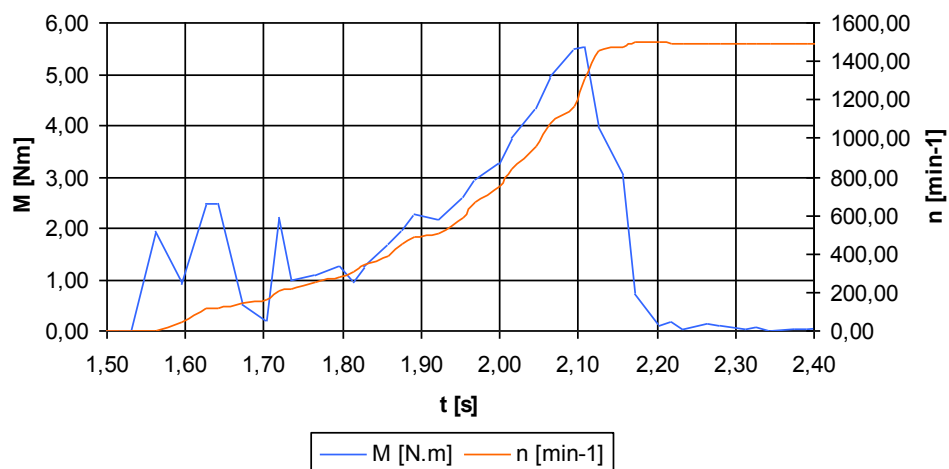
K vypnutí stroje od sítě došlo v čase 4,86 [s]. Na obr. 5.4 jsou průběhy statorového proudu. V okamžiku vypnutí dochází k mírnému zvýšení proudu až do hodnoty 2,7 [A]. Poté proud prudce klesá (se zákrmitem do záporné hodnoty). V čase 4,93 [s] již vinutím neprotéká

žádný proud. Proudový zákmit tedy trval 70 [ms]. Na obr. 5.5 je průběh otáček při odpojení stroje. Nulových otáček je dosaženo v čase 17,85 [s]. Pokles rychlosti tedy trval 13 [s].

5.1.2 Asynchronní motor napájený z transformátoru při jmenovitém napětí $U_N = 400V$



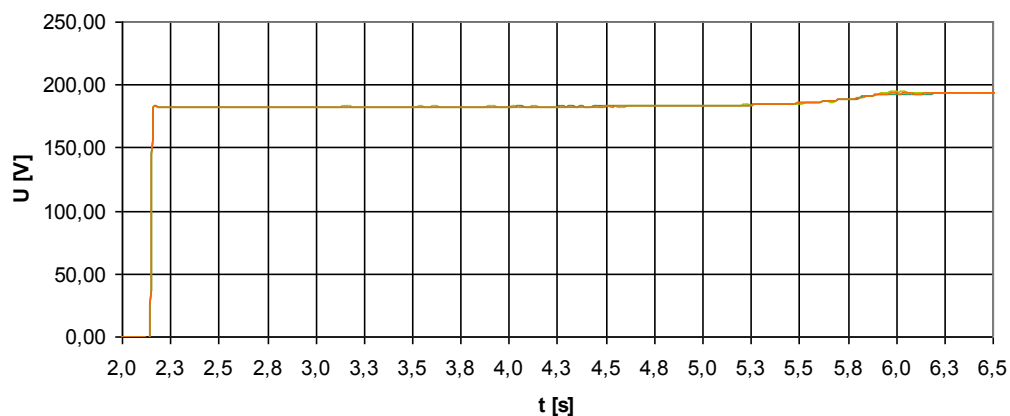
Obr. 5.7 Průběh satorových proudů při připojení stroje k síti při U_N



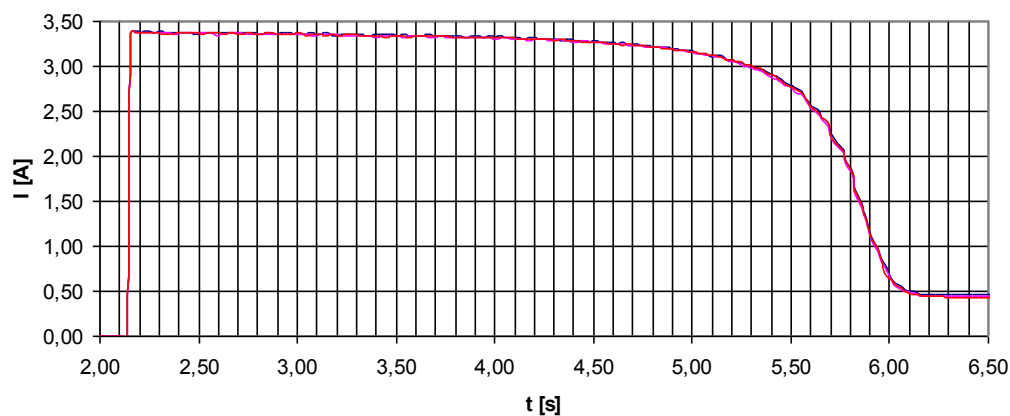
Obr. 5.8 Průběh momentu a otáček při připojení stroje k síti při U_N

K zapnutí elektromotoru k síti došlo v čase 1,56 [s]. Na obr. 5.7 jsou průběhy satorového proudu. Je patrné, že v čase 1,57 [s] prochází vinutím záběrný proud velikosti 8,2 [A]. V čase 2,25 [s] již došlo k ukončení rozběhu a vinutím protéká ustálený proud naprázdno velikosti 2,26 [A]. Rozběh elektromotoru trval 0,7 [s]. Z grafu 5.8 je patrné, během rozběhu stroje z transformátoru dochází k momentovým zákmitům. V čase 2,1 [s] je dosaženo momentu zvratu, poté se moment ustálil na hodnotu momentu ke krytí vlastních ztrát. Rychlost elektromotoru je v ustálení 1494 [min-1].

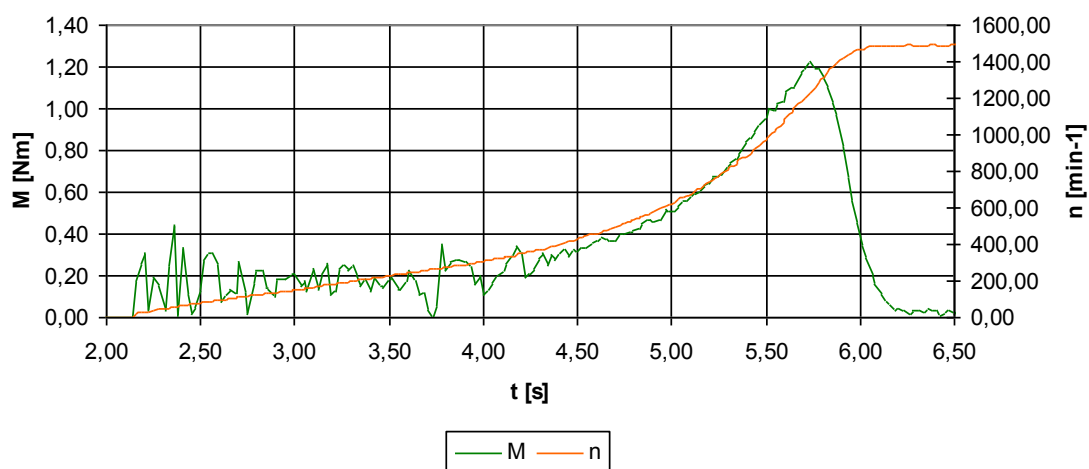
5.1.3 Asynchronní motor napájený z transformátoru při sníženém napětí na 50% U_N



Obr. 5.9 Průběh statorových napětí při připojení stroje k síti při $0,5U_N$



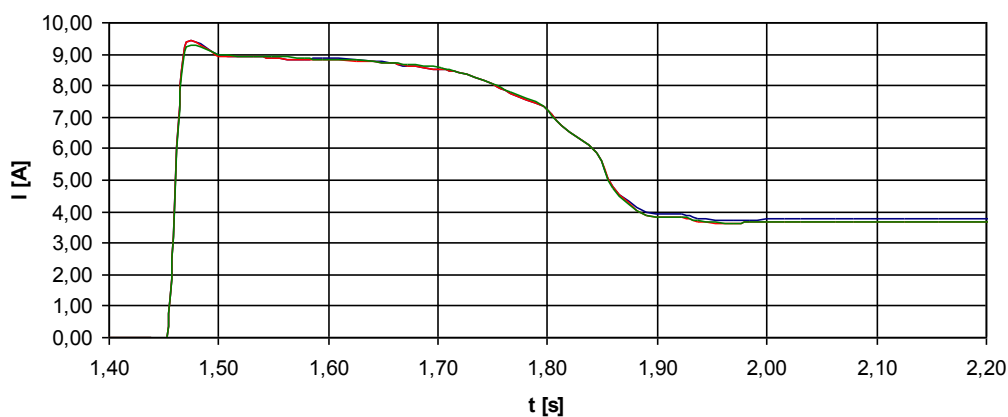
Obr. 5.10 Průběh statorových proudů při připojení stroje k síti při $0,5U_N$



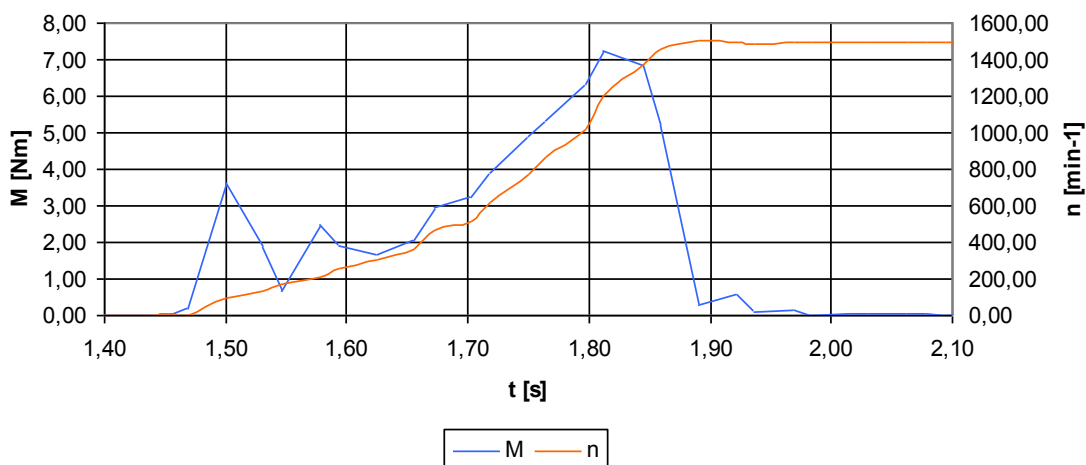
Obr. 5.11 Průběh momentu a otáček při připojení stroje k síti při $0,5U_N$

K zapnutí elektromotoru k síti došlo v čase 2,15 [s]. Na obr. 5.9 jsou průběhy satorového napájecího napětí. Z grafu lze vypořovat, že během rozběhu elektromotoru pokleslo napětí na svorkách transformátoru. Při samotném rozběhu činila jeho velikost 183 [V]. V čase 6,3 [s] již bylo na svorkách naměřeno napětí 195 [V]. Na obr. 5.10 jsou zaznamenány satorové proudy. V okamžiku připojení elektromotoru začal vinutím procházet proud velikosti 3,38 [A]. V čase 6,3 [s] již došlo k ustálení a vinutím protékal proud velikosti 0,45 [A]. Rozběh elektromotoru trval 4,15 [s]. Z grafu 5.11 je patrné, že celý rozběh stroje je doprovázen momentovými zákrmity. V čase 5,73 [s] dosahuje moment hodnoty momentu zvratu 1,22 [Nm]. Poté dochází k jeho poklesu až na hodnotu určenou ke krytí vlastních ztrát. Rychlost elektromotoru je v ustálení 1489 [min⁻¹].

5.1.4 Asynchronní motor napájený z transformátoru při zvýšeném napětí na 120% U_N



Obr. 5.12 Průběh satorových proudů při připojení stroje k síti při 1,2 U_N

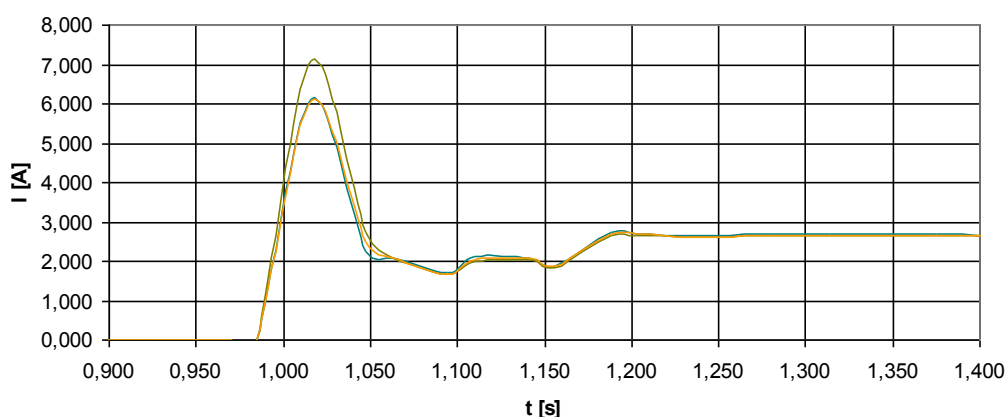


Obr. 5.13 Průběh momentu a otáček při připojení stroje k síti při 1,2 U_N

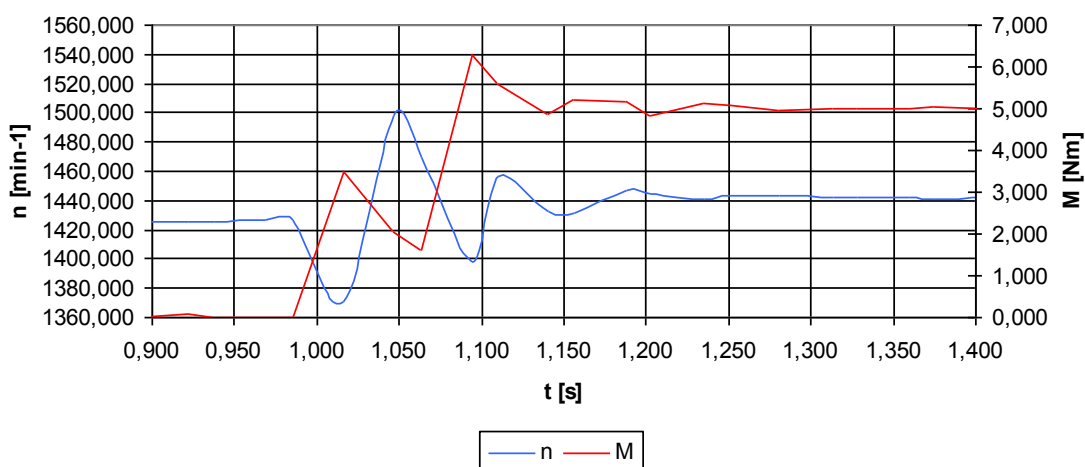
K zapnutí elektromotoru k síti došlo v čase 1,47 [s]. Na obr. 5.12 jsou průběhy statorových proudů. V okamžiku připojení elektromotoru začal vinutím procházet záběrný proud velikosti 9,18 [A]. V čase 2 [s] již vinutím protéká ustálený proud velikosti 3,7 [A]. Rozběh elektromotoru trval 0,53 [s]. Z grafu 5.13 je patrné, že při připojení stroje dojde k momentovému zákmitu velikosti 3,5 [Nm]. Poté dochází k poměrně hladkému nárůstu momentu až do maximálního momentu velikosti 7,1 [Nm] a k jeho ustálení na hodnotu ke krytí vlastních ztrát. Rychlost elektromotoru je v ustálení 1494 [min⁻¹].

5.2 Připojení a odpojení asynchronního motoru s plným zatížením

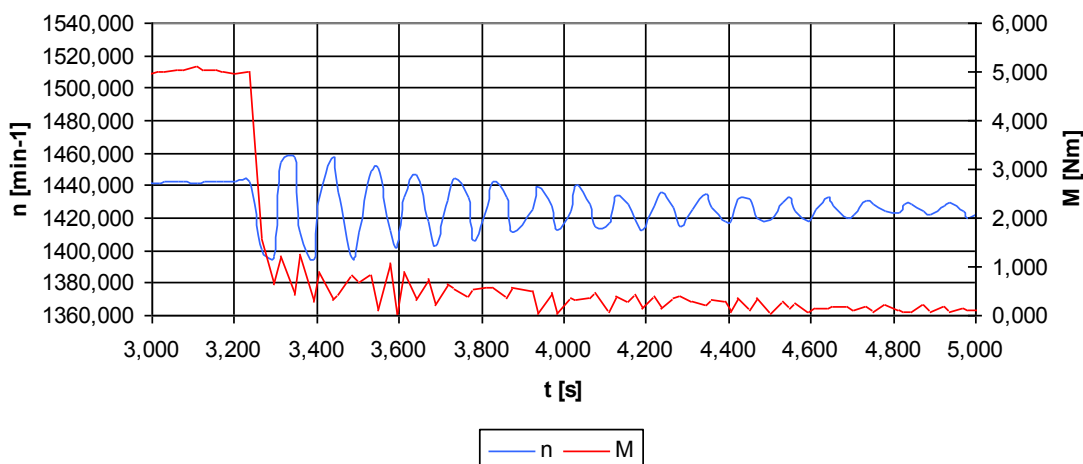
Poznámka: Z důvodů zatěžování zkoumaného elektromotoru dynamometrem (nikoliv tedy kupříkladu brzdou) nebylo možné realizovat samotné připojení stroje do plného zatížení. Měření bylo realizováno tak, že teprve po rozběhu stroje došlo k jeho plnému zatížení dynamometrem.



Obr. 5.14 Průběh statorových proudů při připojení stroje k síti



Obr. 5.15 Průběh momentu a otáček při připojení stroje k síti



Obr. 5.16 Průběh momentu a otáček při odpojení stroje od sítě

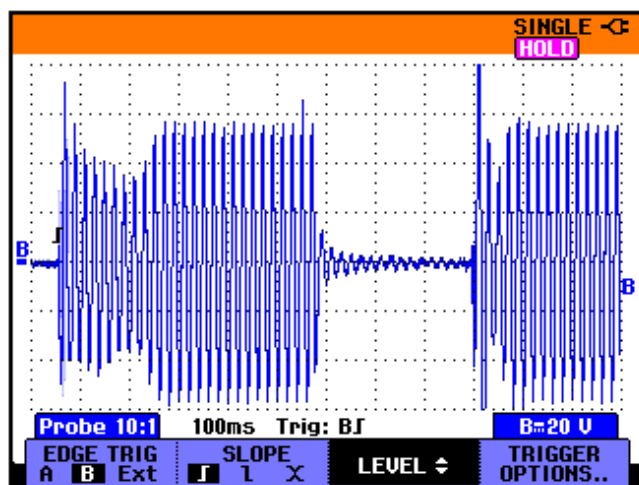
K zapnutí elektromotoru k síti došlo v čase 0,99 [s]. Na obr. 5.14 jsou průběhy statorového proudu. Je možné pozorovat, že velikost záběrného proudu není ve všech fázích stejná. V jedné fázi dosahuje velikost záběrného proudu hodnoty 7,1 [A], kdežto ve zbývajících dvou fázích hodnoty 6,1 [A]. V čase 1,2 [s] již vinutím protéká ustálený proud velikosti 2,66 [A]. Rozběh motoru trvá 0,21 [s]. Na obr. 5.15 je patrné, že v okamžiku zatížení elektromotoru došlo k výraznému zakmitnutí otáček rotoru, přičemž bylo dosaženo zákmitu až do synchronních otáček. Rychlost elektromotoru je v ustálení 1442 [min⁻¹]. Jsou pozorovány rovněž momentové zákmity. Zátěžný moment dosahuje v čase 1,3 [s] velikosti 5,1 [Nm].

K vypnutí stroje od sítě došlo v čase 3,24 [s]. Na obr. 5.16 jsou průběhy otáček a momentu stroje při odpojení. V tomto okamžiku dochází k prudkému poklesu momentu, který je silně zakmitaný a postupně se ustaluje a klesá na nulovou hodnotu. V okamžiku odpojení dochází k silnému rozkmitání otáček elektromotoru. Někdy od okamžiku 4 [s] již v podstatě nejsou snímány otáčky stroje, ale pouze otáčky dynamometru.

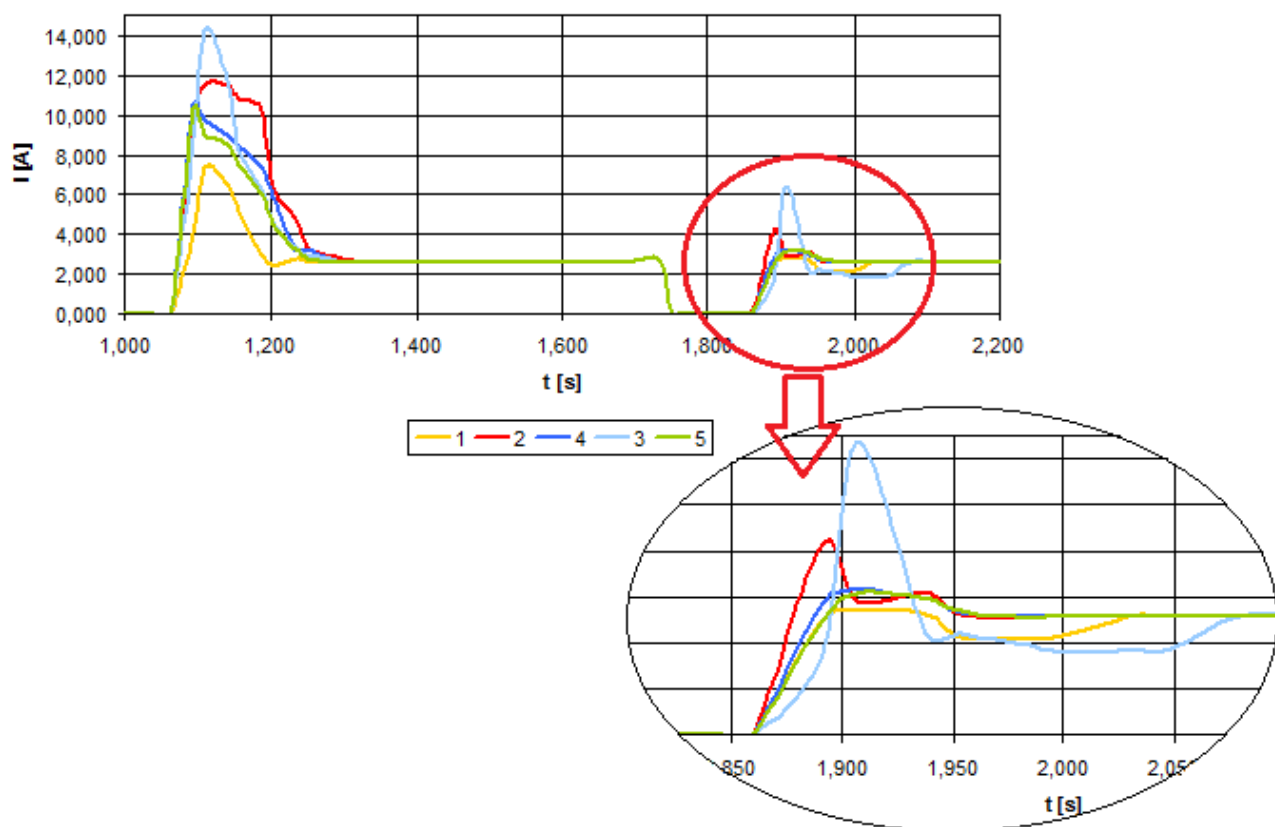
5.3 Opětovné připojení asynchronního motoru k síti

V tomto případě byl stroj ihned po vypnutí od sítě opětovně zapnut. Byl zkoumán vliv zaniklého, či stále existujícího rozptylového magnetického pole statoru na průběhy přechodných dějů při opětovném připojení stroje.

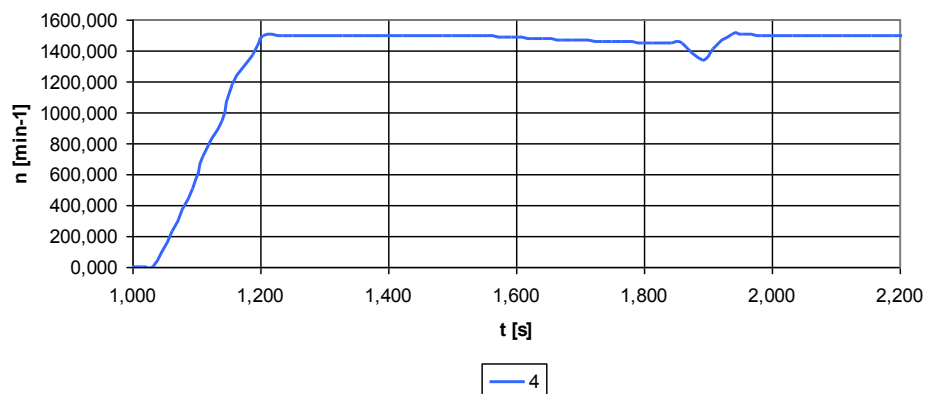
5.3.1 Opětovné připojení stroje se zaniklým rozptylovým magnetickým polem



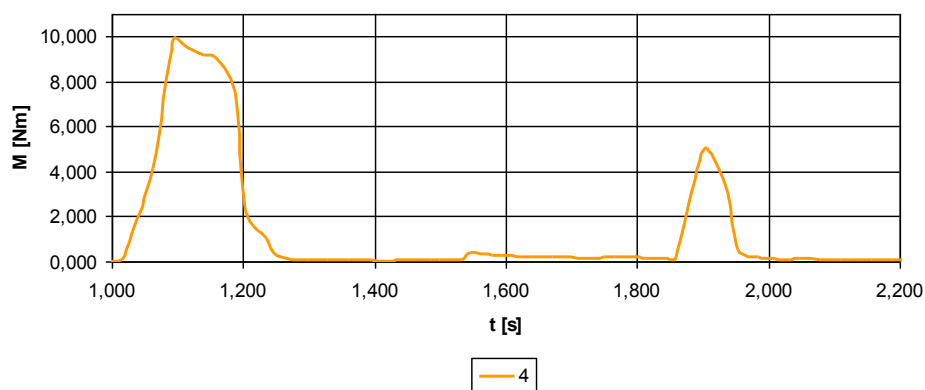
Obr. 5.17 Záznam osciloskopu při snímání rozptylového magnetického pole stroje



Obr. 5.18 Průběhy proudů při opětovném připojení stroje k síti



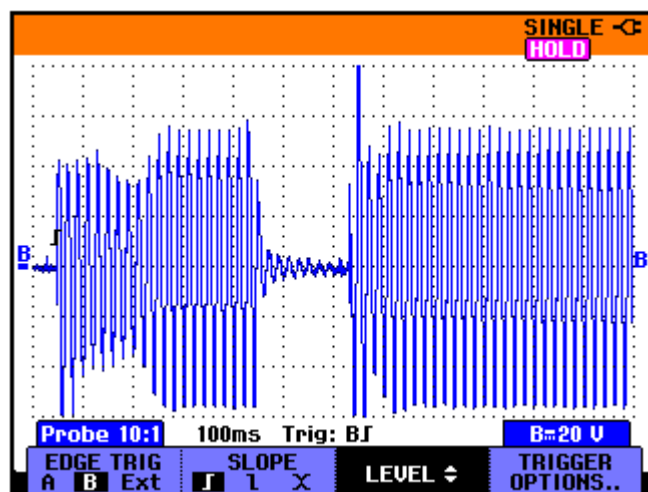
Obr. 5.19 Průběh otáček stroje při opětovném připojení k síti



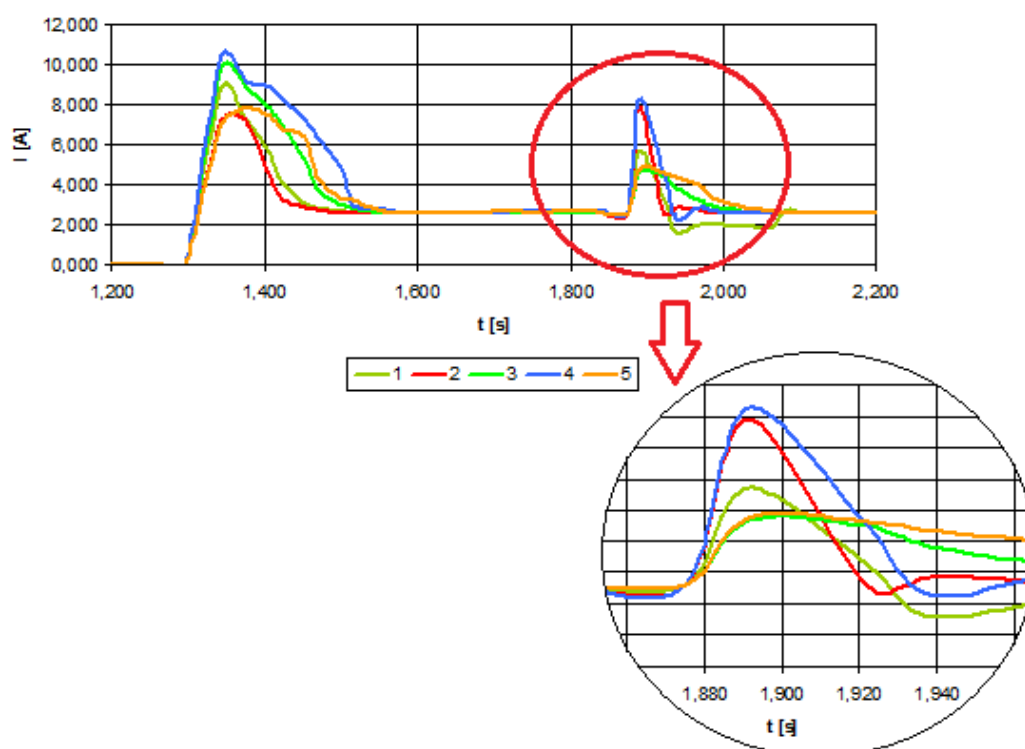
Obr. 5.20 Průběh otáček stroje při opětovném připojení k síti

Měření přechodných dějů při opětovném sepnutí elektromotoru bylo realizováno celkem 5 krát. Cívkou o 10 000 závitů, která byla umístěna na povrchu kostry stroje, bylo prostřednictvím osciloskopu snímáno rozptylové magnetické pole elektromotoru (resp. napětí, které se působením magnetického toku indukovalo do cívk). Záznam z osciloskopu je na obr. 5.17. Na obr. 5.18 jsou průběhy statorového proudu (aritmetické průměry proudů ve všech třech fázích) při 5 krát provedeném měření. Pro vynesení průběhů otáček (obr. 5.19) a momentu (obr. 5.20) bylo použito čtvrté měření. Z obr. 5.18 je patrné, že v okamžiku připojení stroje se pohybuje při všech měřeních velikost proudu v rozmezí 7,8 až 14,2 [A]. V okamžiku opětovného zapnutí pak v rozmezí 2,8 až 6,2 [A]. Z obr. 5.20 je patrné, že momentový ráz u opětovného zapnutí je poloviční oproti momentovému rázu při prvotním zapnutí.

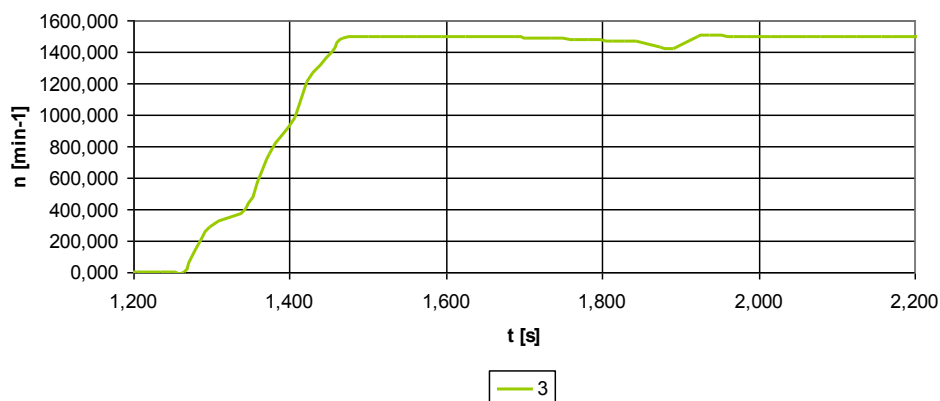
5.3.2 Opětovné připojení stroje s rozptylovým magnetickým polem



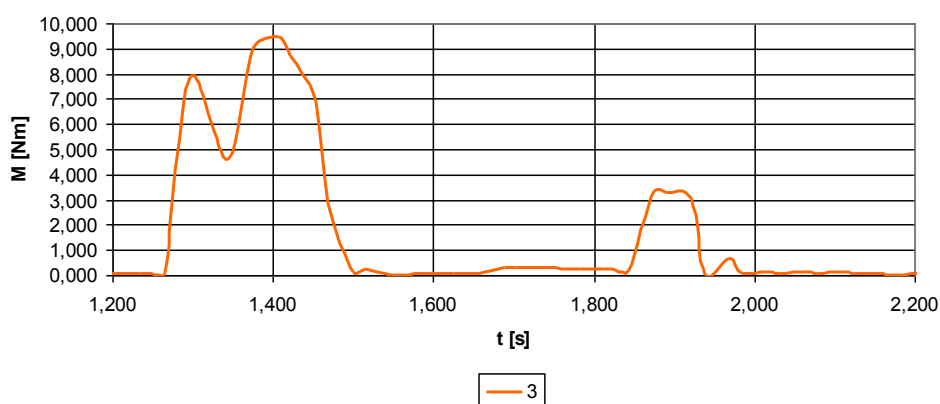
Obr. 5.21 Záznam osciloskopu při snímání rozptylového magnetického pole stroje



Obr. 5.22 Průběhy proudů při opětovném připojení stroje k síti



Obr. 5.23 Průběh otáček stroje při opětovném připojení k síti

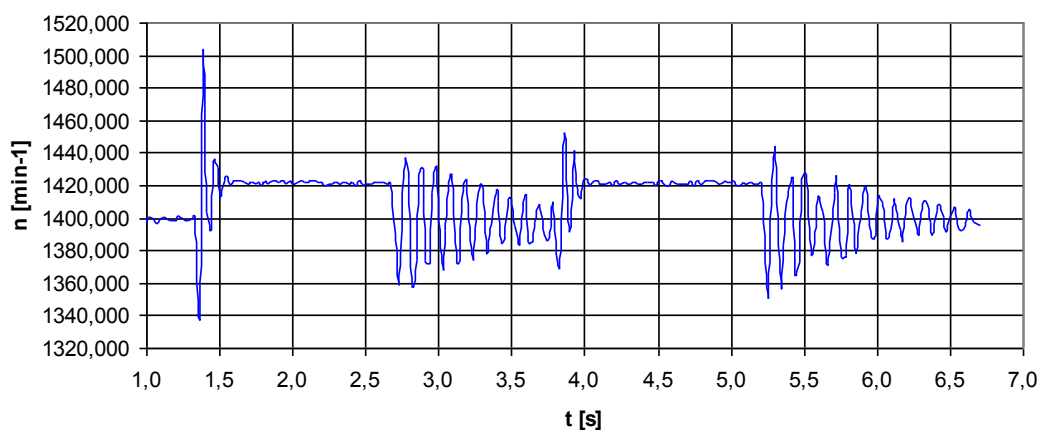


Obr. 5.24 Průběh otáček stroje při opětovném připojení k síti

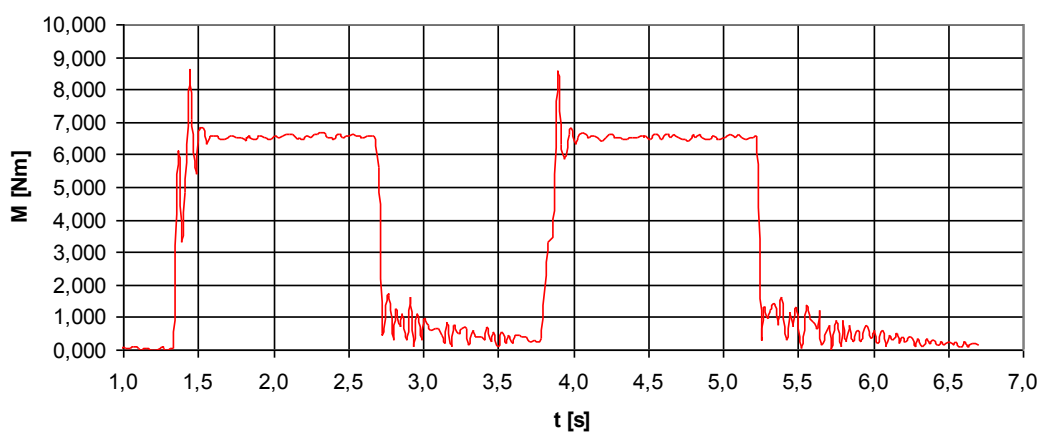
Měření bylo realizováno obdobným způsobem jako v předchozím případě. Záznam z osciloskopu je na obr. 5.21. Na obr. 5.22 jsou průběhy statorového proudu (aritmetické průměry proudů ve všech třech fázích) při 5 krát provedeném měření. Pro vynesení průběhů otáček (obr. 5.23) a mechanického momentu (obr. 5.24) bylo použito třetí měření. Z obr. 5.22 je patrné, že v okamžiku připojení stroje se pohybuje při všech měřeních velikost proudu v rozmezí 7,5 až 10,2 [A]. V okamžiku opětovného zapnutí pak v rozmezí 4,9 až 8,2 [A].

5.4 Asynchronní elektromotor v přerušovaném zatížení

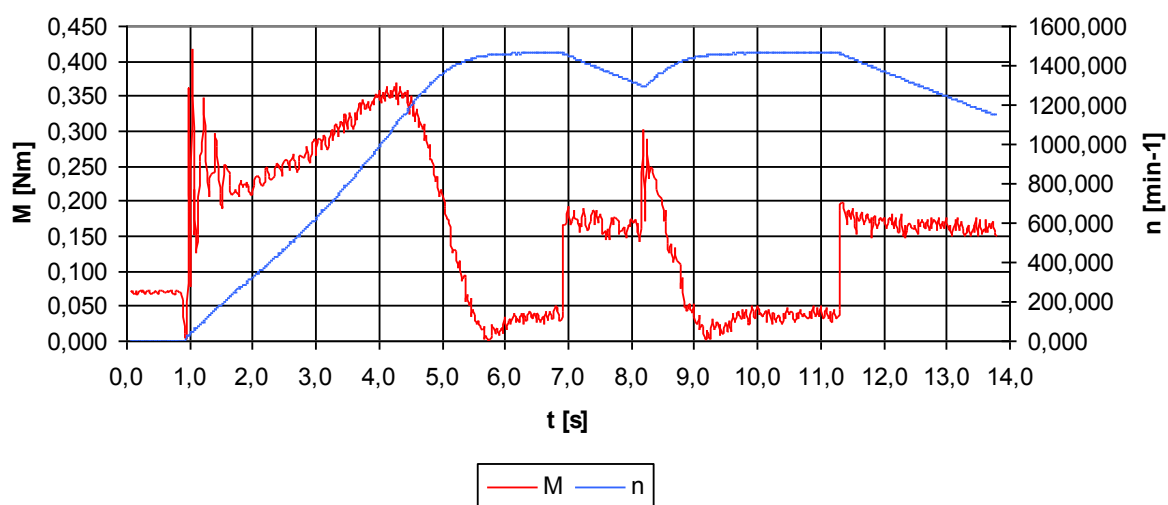
Měření přerušovaného zatížení elektromotoru bylo provedeno při dvou způsobech napájení. Při jmenovitém napájecím napětí a při sníženém napájecím napětí na hodnotu 136 [V].



Obr. 5.25 Průběh otáček stroje při přerušovaném zatížení při napájení U_N ze sítě



Obr. 5.26 Průběh momentu stroje při přerušovaném zatížení při napájení U_N ze sítě



Obr. 5.27 Průběh otáček a momentu stroje při přerušovaném zatížení při napájení 136 V z transformátoru

Na obr. 5.25 je znázorněn průběh otáček elektromotoru v přerušovaném zatížení při jmenovitém napájení. Na obr. 5.26 je průběh mechanického momentu. Z grafů je patrné, že na počátku měření jsou snímány pouze otáčky dynamometru (elektromotor je vypnut). V okamžiku 1,39 [s] je elektromotor spuštěn. V tomto okamžiku jsou na obou průbězích pozorovatelné silné záškuby. Dochází k překmitu rychlosti do synchronních otáček. Momentový záskub v čase 1,44 [s] dosahuje velikosti 8,59 [Nm]. Poté je elektromotor zatěžován momentem 5,6 [Nm] a vyvíjí rychlost 1421 [min⁻¹]. V čase 2,72 [s] dochází k vypnutí zatížení (vypnutí dynamometru). V tomto okamžiku jsou pozorovatelné silné záškuby v rychlosti stroje. Momentové záškuby elektromotoru se pohybují v oblasti momentu ke krytí vlastních ztrát naprázdno. V čase 3,84 [s] dojde k opětovnému zapnutí dynamometru. To je doprovázeno v čase 3,89 [s] momentovým záskubem velikosti 8,52 [Nm]. Poté dochází k ustálení hodnoty na velikost 6,57 [Nm]. Dochází opět k záskubu otáček a k následnému ustálení na hodnotě 1421 [min⁻¹]. V čase 5,22 [s] dochází opět k odpojení zátěže, což je doprovázeno výrazným záskubem otáček. Moment prudce klesá a posléze se pohybuje se kolem hodnoty ztrátového momentu.

Na obr. 5.27 je znázorněn průběh otáček a momentu elektromotoru v přerušovaném zatížení při sníženém napájení na hodnotu napětí 136 [V]. V čase 0,95 [s] je spuštěn elektromotor. Z grafu je patrný pomalý nárůst otáček nezatíženého elektromotoru. V čase 4,44 [s] dosahuje elektromotor momentu zvratu a poté klesá na hodnotu momentu ke krytí vlastních ztrát naprázdno. V čase 6,92 [s] je elektromotor zatížen. V okamžiku zatížení je pozorovatelný lineární pokles otáček stroje. V čase 8,15 [s] dojde k přerušení zatěžování. V tomto okamžiku je pozorovatelný momentový záskub dosahující hodnoty 0,3 [Nm]. Poté dochází k postupnému nárůstu otáček na původní hodnotu a k prudkému poklesu momentu. V čase 11,4 [s] je opět elektromotor zatížen. V okamžiku zatížení je nárůst momentu bez momentového záskubu. Pokles otáček plynule klesá.

5.5 Vyhodnocení realizovaných měření

5.5.1 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení elektromotoru naprázdno

Pro vyhodnocení přechodných dějů při připojení elektromotoru bez zatížení (kap. 5.1) je možné sestavit následující tabulku, v které jsou porovnány hodnoty získané z průběhů:

Tab. 5.1 Porovnání výsledků měření při provozu stroje bez zátěže

PŘIPOJENÍ							
	I_K	t_a	I_0	M_P	M_0	M_{max}	n
U_N síť	11,3	0,24	2,67	-	0,2	10,2	1497
U_N	8,2	0,7	2,26	2	0,15	5,5	1494
$0,5U_N$	3,38	4,15	0,45	1,22	0,2	1,22	1489
$1,2U_N$	9,18	0,53	3,7	3,5	0,1	7,1	1494

Posouzení z hlediska záběrného proudu I_K :

Výrobce udává velikost záběrného proudu 11,38 [A]. Při síťovém napájení U_N byl naměřen záběrný proud 11,3 [A]. Při napájení U_N z transformátoru však bylo dosaženo velikosti 8,2 [A]. Tento rozdíl byl způsoben skutečností, že napájecí transformátor byl regulační, a proto nebylo dost dobře možné naprosto přesně nastavit velikost výstupního napětí na 400 [V]. Při napájení $0,5U_N$ poklesl rovněž i záběrný proud I_K na polovinu vůči U_N při napájení z transformátoru. Při napájení $1,2U_N$ vinutím protéká záběrný proud o 11% větší

Posouzení z hlediska doby rozběhu t_a :

Doba rozběhu elektromotoru t_a se při napájení $0,5U_N$ prodloužila 5,9 krát oproti rozběhu při U_N . Při napájení $1,2U_N$ se však doba rozběhu zkrátila jen nepatrně oproti t_a při jmenovitém napájení z transformátoru. Použitá měřicí souprava bohužel nebyla nejvhodnější pro měření přechodných dějů, poněvadž jí nebylo možné použít kupříkladu k podrobnějšímu snímání momentových zámků při spouštění

Posouzení z hlediska ustálené hodnoty proudu naprázdno I_0 :

Při sníženém napájení je hodnota proudu 5 krát menší oproti proudu při jmenovitém napájení z transformátoru. Při zvýšeném napájení proud naprázdno vzrostl o 60 [%].

Posouzení z hlediska maximálního přechodného momentu M_P :

Ve vztahu 3.21 jsme určili krajní velikost přechodného momentu, který může stroj vyvinout při plném zatížení a při současném zapnutí všech fází na hodnotu 28,91 [Nm]. Bohužel čidlo měřicí soustavy nebylo natolik citlivé, aby bylo schopné snímat rychlé momentové zámkity při připojení stroje k síti, proto jsou naměřené hodnoty značně zkreslené.

Posouzení z hlediska momentu naprázdno M_0 :

Mechanický moment M_0 určený ke krytí vlastních ztrát naprázdno je v ustálení u všech způsobů napájení přibližně stejný. V souvislosti s momentem ke krytí vlastních ztrát při síťovém napájení můžeme konstatovat, že výpočet (3.4) byl proveden správně.

Posouzení z hlediska momentu zvratu M_{max} :

Katalogového momentu zvratu nebylo dosaženo ani při jmenovitém napájení z tvrdé sítě. Z porovnání však vyplývá, že výsledky korespondují s poznatkem, že velikost momentu se mění s kvadrátem napětí. V souvislosti s rozбором mechanického momentu je ještě nutné poznamenat, že v případě napájení z transformátoru se jednalo o napájení z „měkkého zdroje“ a při spouštění motoru tak vznikl na svorkách transformátoru úbytek napětí, který zapříčinil pokles mechanického momentu. Vzniklý úbytek napětí na svorkách transformátoru je pozorovatelný například na obr. 5.9.

Posouzení z hlediska rychlosti stroje n :

Rychlost motoru se při změnách napájecího napětí měnila nepatrně.

Posouzení z hlediska odpojení stroje:

Při odpojení stroje od sítě při U_N byl pozorován proudový zákmit velikosti 2,7 [A], který trval po dobu 70 [ms]. K zastavení rotoru došlo po 13 sekundách. Jak již bylo zmíněno, měřicí souprava nebyla schopna zaznamenávat rychlé změny sledovaných veličin, proto mj. nebyly vyhodnocovány průběhy při vypínání elektromotoru od sítě i transformátoru, neboť na vynesení grafů v okamžiku vypnutí nebyly pozorovány přechodné děje (grafy vypínání proto nejsou v kapitole uvedeny).

5.5.2 Vyhodnocení přechodných dějů při připojení zatíženého elektromotoru

Asynchronní elektromotor připojený k síti se zatížením (kap. 5.2) byl posuzován pouze z hlediska jmenovitého napájecího napětí U_N . Z vynesení průběhů je možné pozorovat, že velikost záběrného proudu není ve všech fázích stejná a dosahovala hodnoty 6,1 resp. 7,1 [A]. Hodnota ustáleného proudu má velikost 2,66 [A]. Rozběh motoru trvá 0,21 [s]. Na obr. 5.15 je patrné, že v okamžiku zatížení elektromotoru došlo k výraznému zakmitnutí otáček rotoru, přičemž bylo dosaženo zákmitu až do synchronních otáček. Rychlost elektromotoru dosáhla v ustálení hodnoty 1442 [min⁻¹]. V okamžiku odpojení dochází k silnému rozkmitání otáček

elektromotoru. Někdy od okamžiku 4 [s] již v podstatě nejsou snímány otáčky stroje, ale pouze otáčky dynamometru.

5.5.3 Porovnání přechodných dějů při provozu naprázdno a v zatížení

Porovnání provozu asynchronního elektromotoru naprázdno a zatíženého při síťovém napájení není snadné, neboť jak již bylo uvedeno, zatížení bylo představováno již spuštěným dynamometrem. Z toho důvodu při zapnutí v zatížení dojde k proudovému nárazu 6,6 [A], kdežto ve stavu naprázdno k 11,3 [A], ačkoliv velikost těchto proudů by měla korespondovat. Rovněž k rozběhu elektromotoru došlo v zatíženém stavu rychleji než ve stavu naprázdno, což bylo způsobeno tím, že rotor zatíženého elektromotoru byl v okamžiku připojení unášen pohybem rotoru dynamometru. Z porovnání vyplývá, že v obou případech provozu protékal satorovým vinutím v podstatě stejný proud 2,66, resp. 2,67 [A]. V případě zatěžování elektromotoru bylo nastaveno zatížení 5,1 [Nm]. Tento moment odpovídá mechanickému výkonu na hřídeli 770 [W]. Při takto zatíženém elektromotoru byla vyvíjena rychlost 1442 [min⁻¹].

5.5.4 Vyhodnocení ostatních přechodných dějů

Zkoumáním spínání elektromotoru do zaniklého a nezaniklého magnetického pole bylo zjištěno, že v případě opětovného sepnutí stroje do ještě ne zcela zaniklého magnetického pole stroje dojde k vyššímu proudovému rázu oproti opětovnému spínání stroje s již zaniklým magnetickým polem. V případě spínání do nezaniklého magnetického pole může v nepříznivých případech docházet k většímu momentovému a proudovému rázu. Bohužel u asynchronních elektromotorů malých výkonů zaniká magnetické pole rychle, protože se nepodařilo zapnutí stroje do vyšší hodnoty zanikajícího pole.

Porovnáním přerušovaného zatížení při jmenovitém napájecím napětí a napětí sníženém na velikost 136 [V] zjistíme, že při sníženém napětí sice výrazně poklesly hodnoty momentu, avšak momentové zákmity jsou v obou případech napájení výrazné, a to při prvotním zapnutí stroje a při opětovném zatížení. Při jmenovitém napájení jsou v případě zapnutí a opětovného zatížení momentové zákmity ve stejných mezích. V případě sníženého napájení je momentové zakmitání při opětovném zatížení menší oproti momentovým zákmitům při prvotním zapnutí. V případě sníženého napájení však byl pozorován momentový zákmít při odlehčení elektromotoru. Při jmenovitém napájení žádný momentový ráz pozorován nebyl. Při sníženém napětí je průběh otáček hladší, bez pozorovatelných zákmitů.

5.5.5 Závěrečné konstatování

Porovnáním všech přechodných dějů, které jsme v rámci měření posuzovali, můžeme vyvodit závěr, že nejvýraznější přechodné děje jsou opět spjaty s připojením a odpojením stroje od sítě. Jak již bylo uvedeno v závěrečném konstatování v kapitole simulování, z hlediska elektrického namáhání vinutí je důležité posouzení velikosti proudového rázu a doby jeho trvání. Zde lze konstatovat, že měřením bylo potvrzeno, že charakter poháněného zařízení (především co do velikosti zátěžného momentu) nemá vliv na velikost proudových rázů, avšak má podstatný vliv na dobu trvání tohoto proudového namáhání, tedy na dobu rozběhu. Jelikož nám jde především o rychlost a plynulost průběhu přechodného děje, je dle získaných hodnot evidentní, že napájení jmenovitým napětím je neoptimálnější pro rozběh. Měřením však bylo prokázáno, že je velice důležitý výběr zdroje (transformátoru). Především co do schopnosti udržení konstantní velikosti napětí na svorkách při připojení elektromotoru. V našem případě došlo při připojení elektromotoru k úbytku napětí na svorkách, což ovlivnilo především velikost momentu.

V rámci měření nebylo možné posuzovat všechny provozní stavy, které byly nasimulovány, avšak bylo možné zkoumat (na rozdíl od simulace), jaký vliv má na znovu-zapnutí stroje rozptylové magnetické pole. Vzhledem k poměrně malému výkonu elektromotoru se sice nepodařilo (i při opakovaném měření) zapnutí stroje do vyšší hodnoty zanikajícího pole, avšak i přesto bylo dokázáno, že v případě opětovného sepnutí stroje do ještě ne zcela zaniklého magnetického pole stroje dojde k vyššímu proudovému rázu oproti opětovnému spínání stroje s již zaniklým magnetickým polem.

Závěrem je nutné zmínit, že použitá měřicí souprava nebyla z důvodu nízké citlivosti čidla příliš vhodná pro zkoumání rychle probíhajících přechodných dějů, což vyhodnocování přechodných dějů poněkud zkomplikovalo.

6. VYHODNOCENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ V ASYNCHRONNÍM STROJI

Podrobné vyhodnocení přechodných dějů zkoumaných na simulačním modelu bylo provedeno v kap. 4.9. Podrobné vyhodnocení přechodných dějů zkoumaných měřením bylo provedeno v kap. 5.5. Za účelem vyhodnocení přechodných dějů v asynchronním stroji provedeme porovnání dat získaných simulací s naměřenými hodnotami a hodnotami teoretickými, které je možné určit z katalogu výrobce. S ohledem na všechna provedená měření a simulace je nejvhodnější provést porovnání získaných dat pro připojení stroje k síti, a to ve stavu naprázdno. Tento provozní stav nám totiž poskytuje největší množství získaných dat. Výsledky je možné pro přehlednost zahrnout do dvou následujících tabulek:

Tab. 6.1 Výsledky simulace pro připojení elektromotoru k síti naprázdno

VÝSLEDKY SIMULACE							
	I_K	t_a	I_0	Te_P	Te_{max}	Te_0	n
U_N	11,83	0,26	2,53	23,79	15	0,7	1493
$0,5U_N$	5,92	1,1	1,26	6	3,94	0,67	1471
$1,2U_N$	14,18	0,2	2,96	34,09	21,52	0,69	1495

Tab. 6.2 Výsledky měření pro připojení elektromotoru k síti naprázdno

VÝSLEDKY MĚŘENÍ							
	I_K	t_a	I_0	M_P	M_{max}	M_0	n
U_N síť	11,3	0,24	2,67	-	10,2	0,2	1497
U_N	8,2	0,7	2,26	2	5,5	0,15	1494
$0,5U_N$	3,38	4,15	0,45	1,22	1,22	0,2	1489
$1,2U_N$	9,18	0,53	3,7	3,5	7,1	0,1	1494

Naměřená a nasimulovaná data můžeme porovnat s teoretickými předpoklady z tab. 6.3:

Tab. 6.3 Teoretické předpoklady pro posuzovaný asynchronní stroj

TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY							
	I_K	t_a	I_N	I_μ	M_Z	M_{max}	M_P
U_N	11,85	0,33	3,25	2,7	12,35	14,67	28,91

Z následujících tabulek je možné vypořádat, že zátěžný proud I_K získaný simulací a měřením koresponduje s katalogovou hodnotou (naměřená hodnota pro síťové napájení je o 0,55 [A] menší než katalogová. Tato nepřesnost je patrně dána neschopností čidla měřicí soupravy snímat rychlé změny veličin). Při měření připojení stroje k síti s napájením 400 [V] z transformátoru došlo ke zmenšení zátěžného proudu I_K (protože na svorkách nebylo nastaveno plné napětí 400V) a rovněž k prodloužení doby rozběhu t_a . Tento jev byl způsoben tzv. „měkkostí“ tohoto zdroje, přičemž při připojení došlo ke vzniku úbytku napětí na svorkách transformátoru, který způsobil, že poklesla hodnota M_Z a zvětšila se doba rozběhu. Z tohoto důvodu je nutné v praxi důkladně vyhodnocovat použitelnost konkrétního transformátoru pro napájení asynchronních elektromotorů. Doba rozběhu při síťovém napájení koresponduje s hodnotou získanou simulací. Tyto doby rozběhu však není možné porovnávat s dobou rozběhu, která byla na základě katalogových hodnot určena vztahem 3.20, kde jsme předpokládali rozběh při jmenovitém zatížení.

Hodnoty proudu naprázdno získané simulací a měřením rovněž spolu korespondují. Budeme-li brát v potaz, že proud naprázdno je z většiny proudem magnetizačním, můžeme tyto proudy naprázdno porovnat s proudem magnetizačním (výpočet 3.3), který jsem rovněž zahrnul do tabulky teoretických předpokladů.

Vzájemně porovnávat zátěžný moment stroje M_Z získaný měřením s maximálním přechodným momentem získaný simulací M_P není dost dobře možné. Lze porovnat M_P získaný simulací z tab. 6.1 s výpočtem 3.21, který je rovněž uveden v tab. 6.3. I v tomto případě byl teoretický předpoklad splněn.

Porovnáním ztrátového momentu z tab. 6.2 s výpočtem 3.4 zjistíme, že výpočet byl proveden správně. Z tabulek 6.1 a 6.2 je rovněž možné zpozorovat, že průběhy otáček opět korespondují.

Naměřené výsledky při jmenovitém napětí tedy plně korespondují s nasimulovanými průběhy. Při sníženém a zvýšeném napájecím napětí se již výsledky ze simulací a z měření mírně liší. Lze však konstatovat, a z vynesných charakteristik měření je to rovněž patrné, že tyto výsledky nejsou v souladu proto, že při měření při sníženém napětí bylo použito transformátoru (měkký zdroj), kdežto v simulaci bylo použito tzv. tvrdého zdroje.

Vyhodnocení této práce je pak dvojí. Z hlediska samotných přechodných dějů jsme prokázali, že nejvýznamnějším přechodným dějem z námi posuzovaných je připojování stroje k síti. Rovněž můžeme konstatovat, že měřením bylo prokázáno, že velmi záleží, za jakých okolností je stroj k síti připojen a jaké jsou parametry sítě (zdroje). Měřením bylo prokázáno, že spouštění při konstantním sníženém, ale i zvýšeném napětí není pro asynchronní stroj vůbec optimální.

Druhým vyhodnocením je pak konstatování, že jednak vypočítané parametry a jednak vytvořený simulační model v programu Matlab - Simulink jsou správné, což bylo prokázáno porovnáním s teoretickými výpočty, ale především měřením. Získané průběhy jsou tedy reálné a mohli bychom je použít jako základ dalších teoretických předpokladů při posuzování dalších vlastností stroje při rozmanitých provozních stavech a podmínkách.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce byl rozbor významných přechodných dějů v konkrétním asynchronním stroji. Mým prvotním úkolem bylo nastudování problematiky přechodných dějů v asynchronních strojích v daleko hlubším rozsahu, nad rámec běžné výuky. Podrobným studiem domácí a zahraniční odborné literatury jsem získal přehled v dané oblasti a byl jsem schopen tyto získané poznatky využít při zpracování úvodních kapitol své práce, jejichž účelem bylo poskytnout nutný teoretický základ pro samotné zkoumání a řešení přechodných dějů. S využitím znalostí získaných během celého svého vysokoškolského studia jsem byl dále schopen vypracovat část věnovanou simulacím a měřením na daném stroji.

Svou práci jsem chtěl pojmut maximálně názorně a největší prostor věnovat grafickému rozboru přechodných dějů, přičemž jsem byl názoru, že samotné výsledky měření nemusí být dostatečným zdrojem dat pro posouzení a rozbor přechodných dějů. Proto jsem byl nucen v programovém prostředí Matlab – Simulink vytvořit simulační model asynchronního stroje a realizovat na něm modelování vybraných přechodných dějů. Měřením bylo ověřeno, že získané výsledky z provedených simulací jsou korektní a odpovídají skutečným charakteristikám stroje. Z toho vyplývá, že vytvořený model asynchronního stroje, který je součástí příloženého CD, je možné využít na podrobnější zkoumání vlastností asynchronních strojů, a to i v takových stavech, které je nemožné měřit. Například už v předvýrobní etapě při navrhování nových asynchronních strojů.

Za hlavní přínos své diplomové práce považuji podrobný rozbor přechodných dějů v konkrétním asynchronním stroji. Jsem názoru, že podobný rozbor přechodných dějů v asynchronním stroji s velkým důrazem na simulování a měření těchto dějů v domácí odborné literatuře dosud chyběl.

Závěrem bych rád uvedl, že práce byla realizována s ohledem na aktuální možnosti a vybavení katedrální laboratoře elektrických strojů. Budoucím diplomantům, kteří by chtěli na mou práci navázat, bych doporučil zaměřit svou pozornost na zkoumání přechodných dějů v asynchronních strojích vyššího výkonu provozovaných s frekvenčními měniči.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANSARI, A.A. a D.M. DESHPANDE. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2010, roč. 2, č. 5, s. 1260-1267. ISSN 0975-5462.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-80-7043-509-0.
- [3] BAŠTA, Jan. *Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1962, 309 s.
- [4] BOLDEA, I a S NASAR. *The Induction Machine Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002, 950 s. ISBN 08-493-0004-5.
- [5] BOLDEA, I a Lucian TUTELEA. *Electric Machines: Steady State, Transients, And Design with MATLAB*. Boca Raton: CRC Press, 2010, 775 s. ISBN 978-142-0055-726.
- [6] DAS, J. *Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition, And Mitigation*. New York: McGraw-Hill, 2010, 722 s. ISBN 00-716-2248-9.
- [7] HRABOVCOVÁ, Valéria. RAFAJDUS, Pavol. FRANKO, Marek. HUDÁK, Peter. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 2.vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně, 2009, 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2
- [8] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2002, 135 s. ISBN 80-248-0025-X.
- [9] CHMELÍK, Karel. *Stejnoseměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, 127 s. ISBN 80-707-8857-7.
- [10] KALAŠ, Václav. JURIŠICA, Ladislav. ŽALMAN, Milan. *Technická kybernetika elektrických pohonů*. 1.vyd. Bratislava: ALFA, 1978, 392 s.
- [11] KRAUSE, Paul C, Oleg WASYNCZUK a Scott D SUDHOFF. *Analysis of Electric Machinery And Drive Systems*. 2nd ed. New York: IEEE Press, 2002, 613 s. ISBN 978-0-471-14326-0.
- [12] MATLAB - *User Guide*
- [13] MĚŘIČKA, Jiří. *Obecná teorie elektrického stroje*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1973.
- [14] Moeller - *Aplikační příručka zapojení - Spínací a řídicí přístroje nn*
- [15] ONG, Chee-Mun. *Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR, 1998, 626 s. ISBN 01-372-3785-5.
- [16] PAVELKA, Jiří, Zdeněk ČEŘOVSKÝ a Jiří JAVŮREK. *Elektrické pohony*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 221 s. ISBN 80-010-2314-1.
- [17] PETROV, G. *Elektrické stroje 2: Asynchronní stroje-synchronní stroje*. 2. oprav. a dopl.vyd. Praha: Academia, 1982, 728 s.